

Desenvolvimento do componente náutico ‘hidrofoil’ através de técnicas avançadas de CAD/CAM, com recurso à Engenharia Inversa



Sebastião Batschelet Rosas

08-09-2014

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA
À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO EM
ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

Agradecimentos

Ao professor Vítor Martins Augusto por me ter acompanhado e orientado durante o seminário e estágio de dissertação.

Ao CINFU, pela forma como fui recebido por todos os seus colaboradores e por me ter disponibilizado todos os recursos utilizados na realização deste projecto.

Ao Eng^o Paulo Aguiar, ao Eng^o Filipe Cruz e ao Sr^o Lourenço Almeida pelas suas disponibilidade, colaboração e por todos os conhecimentos que me transmitiram.

Índice

Agradecimentos.....	1
1 Objectivo.....	3
2 Introdução	4
2.1 Engenharia Inversa	4
2.1.1 Etapas da engenharia Inversa.....	5
2.1.2 Equipamentos de digitalização.....	6
2.2 Desenho assistido por computador CAD.....	8
2.3 Manufatura assistida por computador CAM.....	8
3 Projecto proposto.....	9
3.1 Peça produzida	10
3.2 Melhorias.....	11
4 Execução do projecto	13
4.1 Peça original	13
4.2 Engenharia Inversa	14
4.3 Desenho assistido por computador – CAD.....	17
4.4 Material	24
4.5 CAM	25
4.6 Maquinação da peça	39
5 Conclusão.....	53
6 Bibliografia.....	54

1 Objectivo

No seguimento do Seminário realizado no 1º semestre do ano lectivo de 2013/2014, intitulado “Aprendizagem de PowerMILL e PowerSHAPE para a programação de centros de maquinagem a 3+2 e 5 eixos”, surgiu a oportunidade de realizar o estágio para a dissertação na mesma empresa onde tinha sido efectuado o seminário, contribuindo assim para uma evolução e aplicação dos conhecimentos previamente adquiridos.

O estágio realizado na empresa CINFU (Centro de formação da indústria de fundição) teve como objectivo a integração na vida profissional da empresa em causa e a elaboração de um projecto. O projecto foi também escolhido de maneira a abordar as diversas técnicas utilizadas na indústria de moldes para injeção plástica e fundição. Assim, neste projecto foi utilizado a engenharia inversa de superfícies 3D, para a reprodução de uma peça previamente utilizada, foram efectuadas melhorias do conceito da peça, baseadas em conhecimentos específicos da área em questão, passando pela modelação 3D CAM, realização de um projecto de maquinagem com recurso a um software CAD e maquinagem da peça num centro de maquinação de 5 eixos.

2 Introdução

Nos dias que correm, uma crescente busca pela competitividade e um desejo de uma permanência duradoura das empresas nos mercados, obriga a criação de produtos e serviços, com custos e prazos cada vez mais apertados e com a qualidade dos mesmos assegurado.

Para que uma organização se mantenha competitiva e sobreviva no mercado actual, esta tem de responder aos diversos tipos de pressões tais como: concorrência, absorção de novas tecnologias, influência do mercado de trabalho, exigências da sociedade e, principalmente, desejos do consumidor.

Quando uma empresa decide desenvolver, criar e disponibilizar um novo produto no mercado, o seu objectivo principal é conseguir reduzir os custos e tempos de produção. Na etapa de desenvolvimento, esta redução pode ser conseguida através da engenharia inversa, que permite a criação de produtos em prazos reduzidos, com ganhos na qualidade e redução dos custos. O conceito da engenharia inversa consiste na criação de modelos virtuais a partir de produtos já existentes.

2.1 Engenharia Inversa

A engenharia inversa é uma tecnologia que engloba uma diversa gama de actividades com diversos conceitos multidisciplinares que se complementam. De seguida serão apresentadas algumas definições de autores consagrados:

Varady (1997) – “Enquanto a engenharia convencional transforma conceitos e modelos em peças reais, a Engenharia Reversa transforma em engenharia modelos e conceitos.”

Dickin (1996) – “A Engenharia Reversa consiste em produzir novas peças, produtos ou ferramentas a partir de modelos ou componentes existentes.”

Daschbach (1995) – “A Engenharia Reversa é o processo de levantar dimensões, com rapidez e exactidão, determinar padrões geométricos tais como áreas e volumes além de definir as tolerâncias de um modelo existente.”

Puntambekar (1994) – “Apesar do processo de Engenharia Reversa (que começa com um modelo físico e termina com um modelo CAD) aparentar ser o oposto do processo de manufatura convencional (que começa com um modelo CAD e produz uma peça física) na verdade os conceitos globais são muito similares, figura1. A principal diferença, é que o protótipo existente na Engenharia Reversa incorpora a especificação do produto em manufatura convencional.”

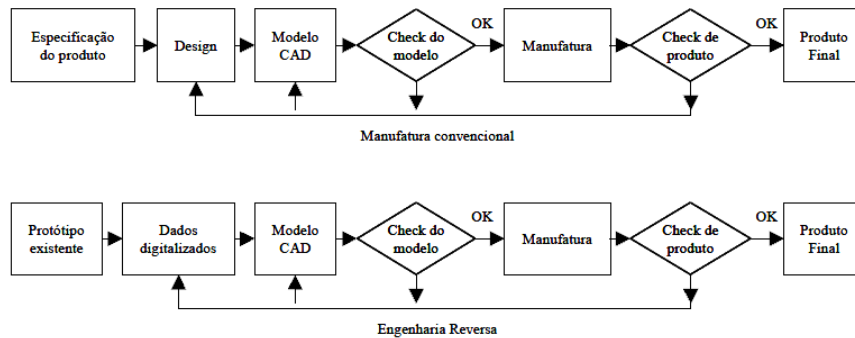


Figura 1 - Fluxograma do processo de manufatura

A engenharia inversa é utilizada por diversas razões. Para a digitalização de ferramentas cuja geometria não existe em formato digital, criação de cópias de peças existentes, tanto para o mercado das imitações como para o mercado de peças suplentes de produtos descontinuados. A engenharia inversa pode ainda ser utilizada para a criação de produtos novos a partir de peças existentes. Na indústria automóvel é também muito utilizada para a criação de modelos CAD das maquetes de barro, utilizadas para esculpir as principais linhas de design do carro. [1][2]

2.1.1 Etapas da engenharia Inversa

A engenharia inversa é um processo que pode ser dividido em duas etapas: a digitalização do produto e a criação de um modelo CAD a partir da digitalização do produto (Puntambekar, 1994).

1- Digitalização do produto

Para este fim, existem uma enorme variedade de equipamentos dimensionais.

As principais funcionalidades exigidas a um equipamento de digitalização são

evitar estragos nas superfícies do protótipo ou da peça a ser medida, e velocidade de trabalho. No final deste processo, obtém-se uma nuvem de pontos. A distância entre os pontos é muito importante para a obtenção de uma superfície o mais precisa possível, especialmente em zonas em que há uma curvatura acentuada.

2- Criação do modelo CAD

Este é um dos passos mais cruciais na engenharia inversa, uma vez que o resultado da digitalização é uma nuvem de pontos no espaço. É necessário então criar superfícies que assentem, com a maior precisão possível, na nuvem de pontos. Este passo é essencialmente efectuado, manualmente nos programas de modelação CAD. [1][2]

2.1.2 Equipamentos de digitalização

Existem diversos equipamentos para a digitalização de superfícies. Abaixo serão descritos três dos principais métodos de digitalização, e, os equipamentos mais utilizados para cada método.

1- Braços de 5 ou 6 eixos por palpação

Estes equipamentos são principalmente utilizados para realizar duas tarefas: controlo dimensional e digitalização. Estes equipamentos não permitem a digitalização 3D de nuvens de pontos, pois, estão apenas equipados por uma ponteira, e, toda a operação de digitalização é efectuada manualmente pelo operador. Se fosse criada uma nuvem de pontos demoraria demasiado tempo. O utilizador movimenta então o braço mecânico manualmente, colocando a ponteira no ponto, a ser medido, e de seguida prime um botão que acciona uma leitura das coordenadas dos braços, que por sua vez, dá as coordenadas do ponto medido. Este tipo de sistema tem a vantagem de ser polivalente, ou seja, pode ser utilizado para a medição e digitalização, e é também um sistema portátil. As desvantagens deste sistema é a reduzida precisão dimensional e o

fato de este tipo de equipamento não permitir a captura de nuvens de imagens.

2- Sonda de digitalização por palpação

Este tipo de equipamento é muito similar aos equipamentos de controlo dimensional, mas o princípio de funcionamento é muito diferente. No controlo dimensional, a ponteira não está sempre em contacto com a peça, mas sim levanta, pausa e grava ponto a ponto. As sondas de digitalização, por outro lado, estão em permanente contacto com a peça, medindo-se a variação da força de contacto, que é compensada, em tempo real, pelo sistema de posicionamento. Através da variação de três resistências, mede-se a direcção normal da superfície, sendo que o sistema de posicionamento terá de compensar a compressão do palpador ao seguir a superfície. Este tipo de equipamento possui ainda um algoritmo de digitalização inteligente para que sejam apenas capturados pontos dentro de um determinado desvio definido pelo utilizador. De outra maneira seriam capturados pontos de forma continua que resultaria em ficheiros demasiados grandes. Este tipo de equipamento pode ser uma máquina dedicada apenas à digitalização, como a Renishaw Cyclone, ou uma fresadora adaptada para o efeito. As principais vantagens deste tipo de método e equipamento: são as elevadas qualidades de captura de pontos, é um sistema totalmente autónomo e não cria problemas em paredes verticais. Por outro lado, algumas das suas desvantagens são a sua lentidão, por existir contacto com objecto, não pode ser efectuado em materiais moles, e, mesmo usando em materiais duros haverá sempre o risco de danificar ou riscar a superfície da peça, sendo que não é aconselhável utilizar em peças frágeis.

3- Sondagens de triangulação laser. Este tipo de equipamento é um sistema de digitalização sem contacto. É projectada uma linha com um laser no objecto, que é capturada por uma ou várias câmeras em posições e ângulos conhecidos. O sistema determina então por triangulação, a posição no espaço da linha projectada. Este tipo de sistema tem a vantagem de não existir contacto com a peça a ser digitalizada e também de ser uma metodologia bastante rápida.

Algumas das desvantagens associadas a este sistema são os problemas relativos ao ruído, às sombras e também às paredes verticais. [1][3][4]

2.2 Desenho assistido por computador CAD

Desenho assistido por computador é a utilização de um programa de computador para a criação, modificação, análise ou optimização do desenho de um produto. O CAD é utilizado de maneira a otimizar a produtividade e a qualidade do produto que se pretende obter. Com a utilização destes softwares, a criação de peças com elevado grau de complexidade tornou-se bastante fácil. Com as inúmeras ferramentas disponíveis nos programas de modo a assegurar paralelismos, perpendicularidades e formas geométricas perfeitas, os desenhos técnicos dos produtos tornaram-se muito mais fiáveis e mais fáceis de serem interpretados.

Durante o estágio realizado, foi possível a aplicação e melhoria dos conceitos adquiridos durante a elaboração do seminário de preparação à dissertação. Assim, também neste estágio foi utilizado o programa CAD PowerSHAPE. Este software é utilizado em grande escala em toda a indústria de manufatura de produtos, pois é um programa bom para modelação de sólidos complexos e facilmente transferível para programas de manufatura assistida por computador CAM. [5][6]

2.3 Manufatura assistida por computador CAM

A manufatura assistida por computador é a utilização de um programa de computador de modo a ajudar o utilizador a definir, visualizar e pos-processar o programa de maquinaria, ou controlo numérico, utilizado nos centros de maquinação de 3 eixos, 3+2 eixos e 5 eixos. O principal objectivo do CAM visa a obtenção de uma produção mais rápida, com maior precisão dimensional e também reduzir o consumo de energia e tempo gasto na maquinação de peças.

Neste estágio foi utilizado o mesmo software CAM utilizado no seminário, aperfeiçoando assim os conhecimentos adquiridos durante o mesmo. O software utilizado foi o PowerMILL que é um dos softwares mais utilizados na indústria de manufactura por ser um de fácil utilização e de preço relativamente baixo. [5][7]

3 Projecto proposto

Na construção de barcos à vela sofisticados e de alta competição pretende-se, a exemplo dos aviões, que estes sejam o mais leve possível e de formas geométricas que minimizem o atrito hidro e aero dinâmicos.

As técnicas da indústria aeronáutica (como ensaios em tuneis de vento) são hoje aplicadas na indústria naval.

A America's Cup, uma das mais antigas competições internacionais de vela, realiza-se, desde 1851, de 4 em 4 anos, é talvez o melhor exemplo da evolução posta ao serviço do desporto ao seu mais alto nível. As equipas (sindicatos) com orçamentos de 250 milhões de euros para uma campanha, estando os barcos na vanguarda da evolução tecnológica. Os barcos são construídos, quase na totalidade, em carbono, sendo utilizadas ligas de alumínio, ligas de magnésio e titânio, para a construção de peças críticas, figura 2. A grande evolução desta última America's Cup foi a introdução de hidrofoils nas extremidades dos lemes e das quilhas, que proporcionaram a capacidade de levantar da água os seus enormes cascos a uma altura de cerca 3 metros. Uma vez retiradas da equação as forças de atrito dos cascos, os barcos passaram a movimentar-se a cerca de 2 a 3 vezes mais rápido do que o vento que incide sobre as suas velas, atingindo assim velocidades de cerca 80 quilómetros por hora.



Figura 2 - Barco da 34ª America's Cup

3.1 Peça produzida

O projecto escolhido para esta dissertação foi realizar um hidrofoil para um barco à vela, cuja classe se chama Moth. Estes barcos têm cerca de 2 metros de comprimento, e uma altura de mastro de cerca de 3,5 metros. O peso total do barco é de cerca 9 quilogramas uma vez que este é quase todo feito em carbono, sendo apenas as suas peças mais críticas feitas em ligas de alumínio. A execução deste projecto foi pensada, de modo, a serem utilizadas todas as etapas de construção de moldes para a indústria metalúrgica e plástica: engenharia inversa; CAD; CAM e maquinagem. Como não foi possível a execução de um molde com uma empresa da área, a peça foi escolhida com uma nota mais pessoal, tentando sempre comparar o processo de construção com o da indústria de moldes.

Na figura 3 abaixo pode-se ver uma imagem do barco em andamento, um diagrama das peças fundamentais do barco e a peça que foi escolhida para ser efectuada.



Figura 3 - A) Peça a produzir ; B) Barco Moth a velejar; C) Diagrama do Barco

Como se pode ver, a peça já referida, o hydrofoil, encontra-se na extremidade do leme. Trata-se de uma peça com superfícies de alguma complexidade e, uma vez que, esta peça será utilizada no barco em questão, a precisão da duplicação das superfícies é de relativa importância para que o barco possa então subir quando as velocidades apropriadas sejam atingidas.

3.2 Melhorias

A capacidade de um Moth se levantar da água está directamente ligada à velocidade que o barco se desloca. Tal como nos aviões, para que se produza sustentação, a asa deve ter um ângulo de ataque relativo ao fluxo de ar, fazendo com que este fluxo de ar seja deflectido para baixo. Uma vez que a asa exerce uma força para mudar a direcção do vento, e, aplicando a terceira lei de Newton que constata que “para toda a acção há

sempre uma reacção oposta de igual intensidade”, o ar irá exercer uma força de igual intensidade sobre a asa. Assim, quanto maior for a velocidade do avião maior será a força que irá sustentar o avião.

Para o caso dos Hidrofoils, o princípio de sustentação é igual. Quanto maior for a velocidade do barco maior será a sua sustentabilidade. Quando os ventos são muito fracos, os Moth muitas vezes não conseguem ganhar a velocidade necessária para que possam descolar e por sua vez eliminar as forças de atrito do casco do barco.

Para este projecto foi então proposto que se criasse uma asa em que o corpo central desta, o chamado torpedo, fosse uma peça separada das duas asas de cada lado. O propósito desta inovação, é a capacidade de utilizar asas de tamanho e desenho ligeiramente diferente e que produzam mais sustentabilidade quando se veleja com ventos fracos e asas mais pequenas, com menos sustentabilidade, para ventos mais fortes. Com este hidrofoil, em vez de um velejador ter de comprar dois ou mais hidrofoils completos para os diferentes tipos de vento, poderá comprar a parte central uniforme e, em seguida, comprar apenas as extremidades das asas para os diferentes tipos de vento.

Esta melhoria representa não só um custo menos elevado para o mesmo número de configurações diferentes, mas também uma maior facilidade de mudança de asas devido ao seu fácil método de troca. Na figura 4 abaixo pode-se ver ilustrado a diferença do desenho entre a peça original e as peças separadas e já modeladas em software CAD.

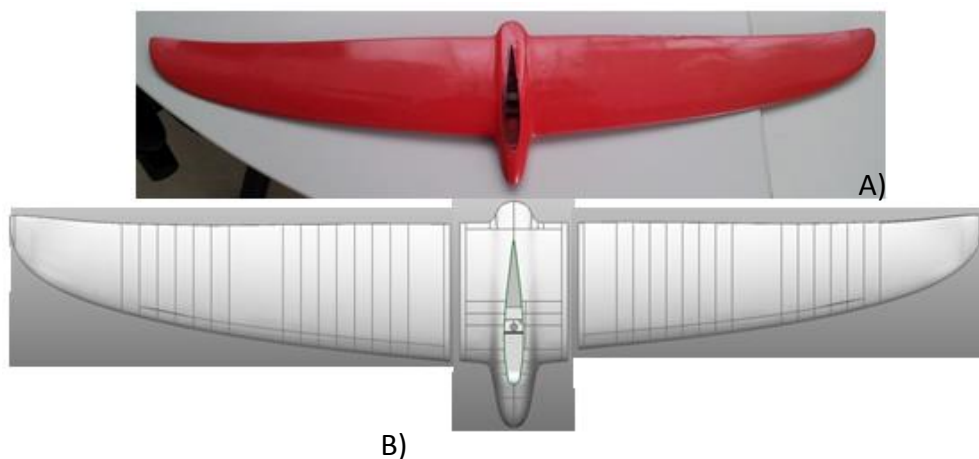


Figura 4 - A) Peça original; B) Melhorias propostas

De modo a simplificar o intercambio de asas, o sistema foi desenhado utilizando apenas dois veios de 6mm de diametro e 40mm de comprimento, que entram dentro de furos efectuados para esse proposito.

4 Execução do projecto

Neste capítulo irá ser discutido todos os passos que foram efectuados para a conclusão do projecto começando na engenharia inversa, passando pela modelação CAD, escolha do material em bruto, execução dos percursos de maquinagem e finalmente maquinação das peças.

4.1 Peça original

A peça original, como já foi dito anteriormente, é um hidrofoil que se encontra posicionado na extremidade do leme do barco moth. As dimensões da peça são de 830 mm de ponta a ponta da asa, 130 mm na sua secção mais larga, parte central do torpedo, e 30 mm de altura na zona mais grossa. O peso total da peça é de 856 gramas. Na figura 5 abaixo estão representadas algumas imagens da peça em questão.



Figura 5 - Hidrofoil do barco Moth

4.2 Engenharia Inversa

Toda a execução deste projecto foi efectuada na empresa CINFU e, como tal, os equipamentos que foram utilizados foram aqueles que se encontravam disponíveis na empresa. Assim, o equipamento utilizado para recriar as superfícies da peça foi o Cyclone II. Este equipamento funciona como sonda de digitalização por palpação, actuando como um interruptor ao tocar sucessivamente na peça. A sonda de digitalização está em permanente contacto com a peça, medindo-se a variação da força de contacto, que é compensada em tempo real pelo sistema de posicionamento. Na figura 6 pode-se ver o equipamento em questão.



Figura 6 - Cyclone II

Este equipamento está directamente ligado a um computador que possui um software que capta toda a informação necessária para criar a nuvem de pontos. Neste caso, o software utilizado foi o CopyCAD da Delcam. Este software possibilita a captação dos dados provenientes do equipamento Cyclone, permitindo ainda a criação de modelos de superfície e construção de modelos de triangulação coesos, a partir de qualquer tipo de dados de nuvens de pontos digitalizados. Na figura 7 abaixo pode-se observar o software em funcionamento.

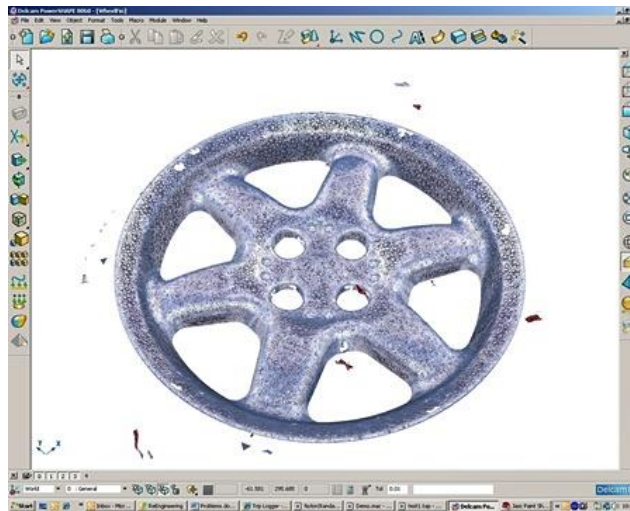


Figura 7 - Software CopyCAD em funcionamento

Uma vez que a peça proposta apresenta uma superfície muito complexa e com dois lados, o primeiro passo a ser realizado foi uma mentalização do processo digitalização. Como a área de medição do equipamento Cyclone é de apenas 500x500 mm, e a peça tem mais de 800 mm de ponta a ponta. Ficou logo claro, que seria impossível medir toda a superfície de uma só vez. Assim, foi tomada a decisão de digitalizar metade do comprimento total da asa, pois esta é simétrica no seu centro. Deixando cerca de 50 mm de tolerância ao centro da peça, foi definida a área a digitalizar.

Sendo que iria ser necessário a medição da superfície superior e inferior da asa, o problema que surgiu foi como casar as duas superfícies, uma vez estas criadas, para criar uma asa sem buracos e alinhada. A solução encontrada foi a colagem de três esferas de 15 mm de diâmetro para que, uma vez digitalizadas as superfícies, fosse mais fácil a união da superfície superior com a superfície inferior. Na figura 8 pode ver-se a localização onde estas foram aplicadas na asa com o uso de cola quente.



Figura 8 - Localização das esferas

Uma vez que neste tipo de digitalização a sonda está em constante contacto com a superfície da asa, exercendo uma pequena força, foi necessário que a asa estivesse bem segura na zona de digitalização do equipamento. Como pode ser observado na figura 9 abaixo, foi necessário o uso de diversos grampos, parafusos e tornos para que a peça não se deslocasse. Depois de digitalizada a superfície superior, a asa foi virada ao contrário, digitalizando-se assim a superfície inferior.

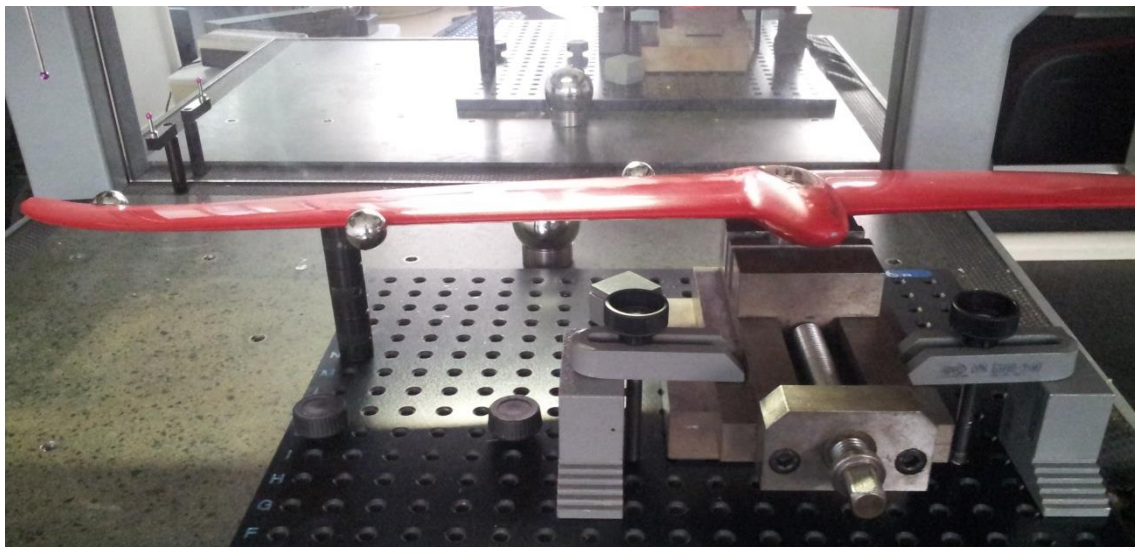


Figura 9 - Sistema de ancoramento da asa para digitalização

O próximo passo a ser efectuado na elaboração da engenharia inversa da asa foi a definição dos parâmetros de digitalização. Como só seria necessário a digitalização de meia asa, que ocupa uma área de cerca 400 x 150 mm, e o equipamento tem uma área de digitalização de 500 x 500 mm, foi definido uma área de digitalização para que fosse poupado algum tempo na digitalização. Foi então criado um paralelepípedo de 500 x 200 x 70 mm no software, restringindo a área de digitalização dentro desse mesmo paralelepípedo. Foi escolhida e medida, uma sonda com uma esfera na sua ponta com 5,014 mm. A sonda utilizada é de tamanho relativamente pequeno e foi escolhida por haver zonas com detalhes muito pequenos que de outra forma não seriam detectados por uma sonda com uma esfera de tamanho maior.

A definição do passo lateral, ou seja, quanto a sonda se desloca lateralmente a cada passagem, é também um parâmetro muito importante a ser definido. Um passo lateral pequeno, irá resultar numa superfície muito boa e próxima do original, tendo a desvantagem de aumentar muito o tempo de digitalização pois a sonda teria de passar mais vezes pela superfície da asa. Um passo lateral muito elevado por sua vez iria tornar a digitalização mais rápida, mas a superfície poderia não ser tão boa. Assim, foi escolhido um passo lateral de 0.15 mm e foi ainda dado um angulo de digitalização de 45 graus para que as extremidades fossem correctamente capturadas. De outra forma as extremidades da asa, por serem normais ao percurso da sonda, iriam produzir muitos erros na nuvem de pontos.

Após a captura das superfícies superior e inferior da peça por nuvem de pontos, foi então criada uma superfície de triangulação no software CopyCAD. Os parâmetros utilizados para criar esta superfície foram então um a grelha de triangulação de 0,1500 mm e uma tolerância de 0,0150 mm. Na figura 10 abaixo pode-se ver as duas superfícies de triangulação. [1][2]

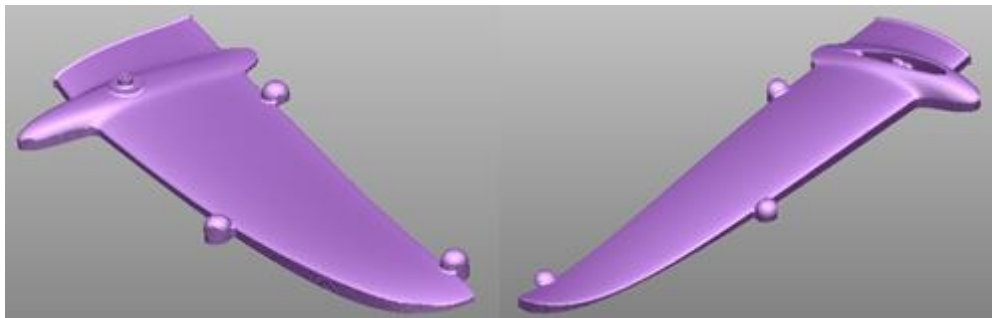


Figura 10 - Superfícies de triangulação

4.3 Desenho assistido por computador – CAD

Toda a parte de desenho assistido por computador foi realizado na empresa CINFU, utilizando os computadores da empresa que possuíam o software CAD PowerSHAPE da Delcam.

A primeira etapa realizada foi a união da superfície superior e inferior da asa. Assim, utilizando as esferas como ponto de referência, esta tarefa foi bastante simplificada. Sem a utilização das esferas durante a digitalização da peça, esta tarefa seria bastante mais complicado, sendo difícil assegurar que as superfícies estavam perfeitamente alinhadas. Na figura 11 pode-se ver o resultado deste processo.

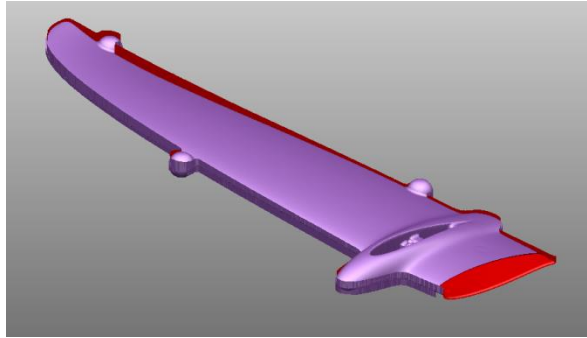


Figura 11 - Alinhamento da superfície superior e inferior

Após efectuada a junção das duas superfícies, o próximo passo a realizar seria a modelação das superfícies da peça. Esta etapa foi realizada em duas secções: modelação da secção da asa e modelação da secção central, ou torpedo. Para a modelação da asa, foram realizadas duas etapas separadas: modelação da parte superior e modelação da parte inferior. Para a modelação da parte superior da asa, foram criadas linhas projectadas, segundo o eixo de X, na superfície de triangulação superior. Foi efectuado o mesmo processo na secção inferior, unindo depois as linhas superiores e inferiores. Em seguida foi criada uma curva composta na zona de união para que se pudesse estabelecer um limite para a criação das superfícies, figura 12. Foram então criadas as superfícies a partir das linhas projectadas e da curva composta.

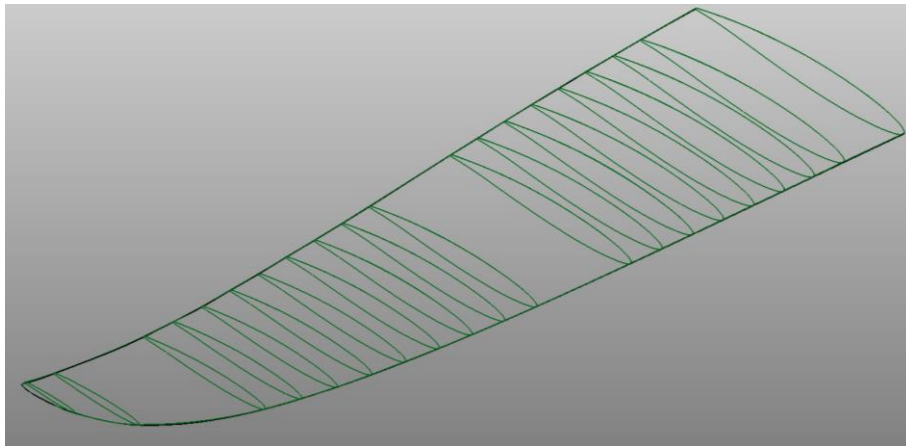


Figura 12 - Modelação das asas

Uma vez modeladas as superfícies da asa, esta foi analisada utilizando uma ferramenta do software PowerSHAPE para verificar que as superfícies se encontravam correctamente modeladas e se as uniões da parte superior e inferior estavam correctamente modeladas. Foram encontrados alguns erros na zona de união como se pode ver na figura 13 A), abaixo. Estes erros de união da superfície superior e inferior foram corrigidos de forma a união entre as duas superfícies fosse o mais subtil possível, figura 13 B).

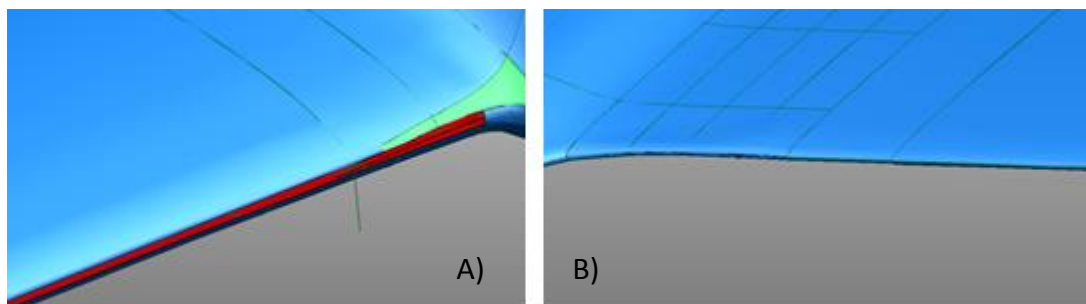


Figura 13 - Resolução de problemas de modelação

Foi ainda comparado, utilizando uma ferramenta do software, a diferença entre a superfície recém modelada com a superfície de triangulação de modo a verificar que não houvesse grandes desvios. Na figura 14 A) podemos ver que havia certas zonas da superfície que se encontravam com uma diferença, demonstrado pela cor azul, mas que maior parte da superfície se encontrava em excelentes condições. Foram

corrigidos os erros na superfície manualmente, jogando com as magnitude e ângulos das linhas que definem as superfícies, figura 14 B).

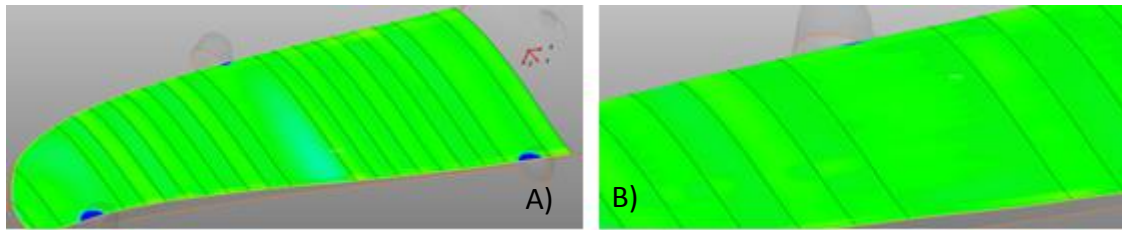


Figura 14 - A) Superfície por corrigir; B) Superfície corrigida

Na modelação da parte central, foram também projectadas linhas na superfície de triangulação superior e inferior, só que, devido a uma maior complexidade da superfície da secção central, foram projectadas não só linhas segundo o eixo de X, mas também segundo o eixo de Y, criando assim uma grelha de linhas projectadas sobre a superfície de triangulação, foi também criada uma curva composta na zona em que as linhas projectadas da secção superior e inferior se encontravam. Para modelar as superfícies foi necessário criá-las em secções distintas devido à grande complexidade da superfície, figura 15.

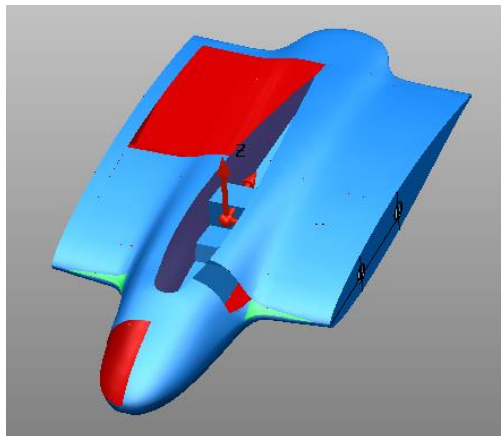


Figura 15 - Modelação do torpedo

Após a modelação da secção central, esta foi também analisada para verificar erros de união. Como se pode ver na figura 16, a zona de união, como nas superfícies da asa,

não se encontravam correctamente modeladas. Foram então efectuadas modificações na superfícies de união, certificando-se que estas estavam correctamente unidas. O resultado destas modificações pode ser observado na figura 16.

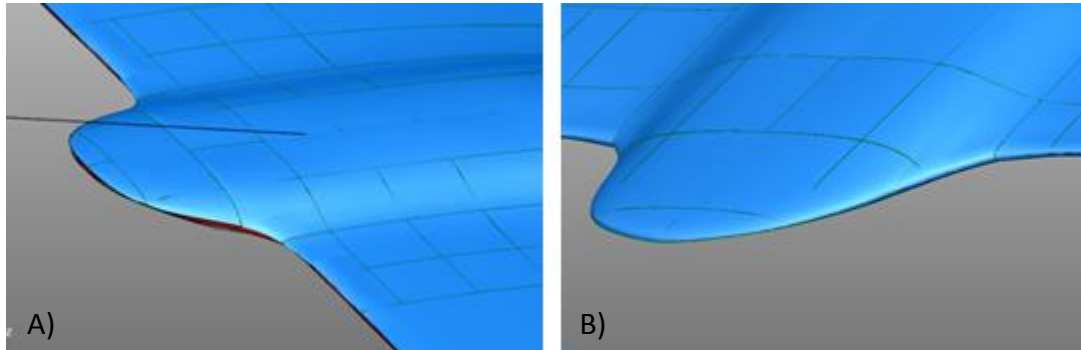


Figura 16 - A) Superfície do torpedo por corrigir; B) Superfície corrigida

Assim como na modelação da asa, para o torpedo foi também comparada a superfície recém modelada com a superfície de triangulação, utilizando a ferramenta do software. Mais uma vez as superfícies não coincidiam perfeitamente. Foi então necessário a correcção da superfície recém modelada, fazendo variar as magnitudes e angulos das linhas que definiam a superfície.

Uma vez que a digitalização da peça foi apenas efectuada em metade da peça, o proximo passo seria entao espelhar todas as superfícies em relação ao centro da peça. O resultado desta operação pode ser observado na figura 17 abaixo.

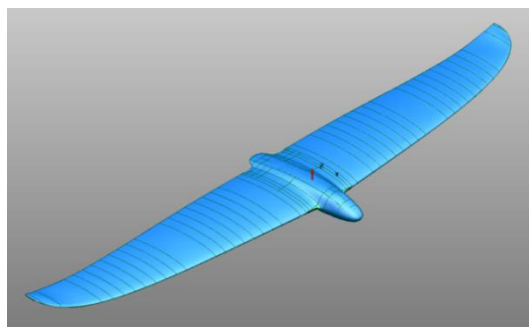


Figura 17 - Hidrofoil modelado

Toda a modelação até aqui foi efectuada utilizando superfícies sem espessura. De modo a se poder efectuar o projecto de maquinagem, foi necessário realizar alguns passos para que tal fosse possível. Numa primeira fase foi necessário passar de um modelo de superfície para um modelo de sólidos, como se pode ver na figura 18.

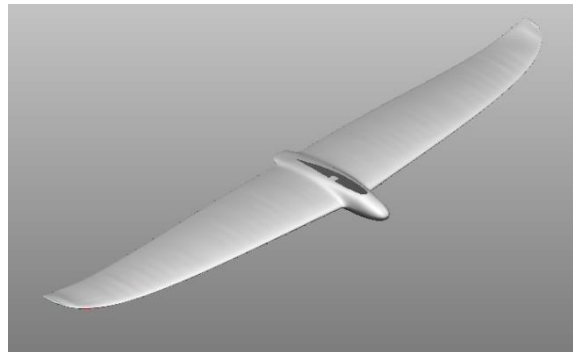


Figura 18 - Hidrofoil convertido em sólido

As melhorias pensadas para este projecto ditavam que a peça seria efectuada em três secções diferentes, as duas asas e o torpedo. O modelo sólido foi então dividido em três secções como tinha sido previamente estipulado. Esta divisão pode ser observada na figura 19 abaixo.

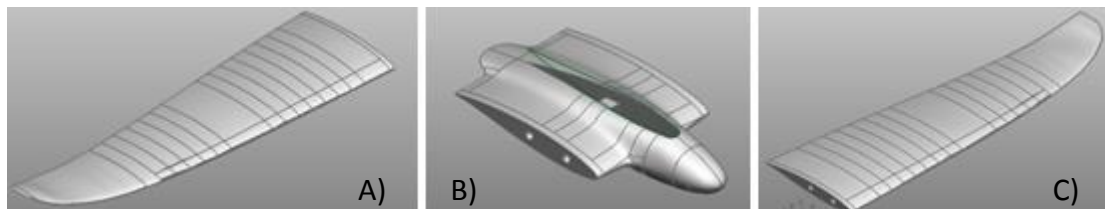


Figura 19 - A) Asa esquerda; B) Torpedo; C) Asa direita

Para que as peças fossem possíveis de serem maquinadas, foi necessária uma reflexão do modo como a maquinagem iria ser realizada e como a peça iria ser fixada no centro de maquinação, assegurando que as peças não iriam mexer e sofressem a menor vibração possível. Foi necessário também nesta etapa, definir qual os tamanhos dos blocos de material para que as peças fossem maquinadas. Para o caso das asas, estas foram medidas com precisão, obtendo-se as medidas de 368.7 x 122.4 x 15 mm. Estas dimensões foram então expandidas de forma a formar uma caixa que representaria o

metal em bruto, tendo em conta o espaçamento de 15 mm entre a asa e o esqueleto, para que as ferramentas pudessem maquinar as superfícies correctamente, uma grossura do esqueleto de cerca 15 mm nas laterais, e nas suas extremidades, com o fim de possibilitar a amarração do bloco no centro de maquinagem, 40 mm. Obteve-se então as dimensões que o material em bruto deveria ter. Estas medidas foram então de 480 x 175 x 30 mm, e, na figura 20 pode observar-se o desenho da asa dentro do esqueleto onde será efectuada a maquinação. Foram ainda criados 4 suportes para a asa, de forma a que ocupassem o menor espaço possível mas que mesmo assim impedissem a vibração da asa.

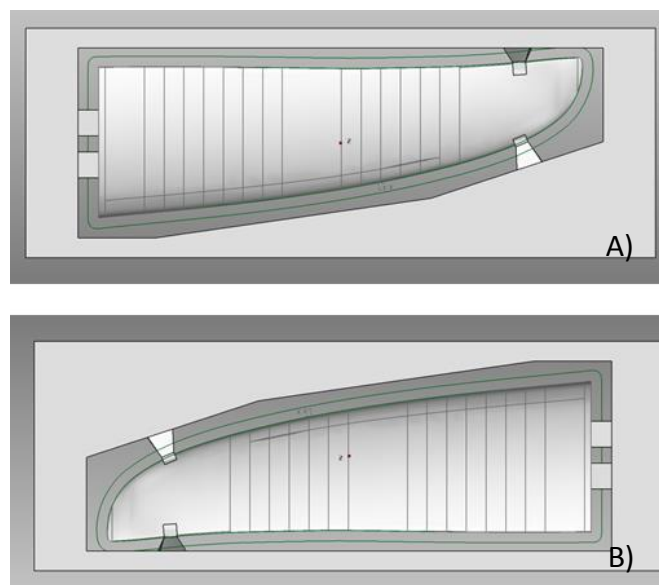


Figura 20 - A) Asa esquerda e seu esqueleto; B) Asa direita e seu esqueleto

Para a secção central, ou torpedo, foi utilizado o mesmo processo anteriormente efectuado. As dimensões da peça foram medidas, obtendo-se valores de 188.5 mm de comprimento, 90 mm de largura e 20 mm de espessura. De modo a facilitar a amarração da peça no centro de maquinagem, foi dado uma grossura ao esqueleto, que suporta a peça, ficando o bloco com 200 mm de largura. Esta diferença de 110 mm é constituída por 40 mm de cada lado para o esqueleto e 15 mm de afastamento da peça ao esqueleto, para que as ferramentas possam alcançar a zonas pretendidas. No seu comprimento, o bloco foi definido com 240 mm para que o esqueleto possuísse uma espessura de 10 mm de cada lado da peça e foi também deixado um espaço de 15

mm entre a peça e o esqueleto para que as ferramentas alcançassem as zonas pretendidas. Foram também criados 4 suportes que ligam a peça ao esqueleto, de maneira a que a peça ficasse bem segura, impedindo que ela vibrasse com a passagem das ferramentas, e uma vez que a peça estivesse pronta, fossem facilmente retirados. Na figura 21, pode-se observar as alterações efectuadas ao desenho do torpedo, para que a peça fosse maquinada.

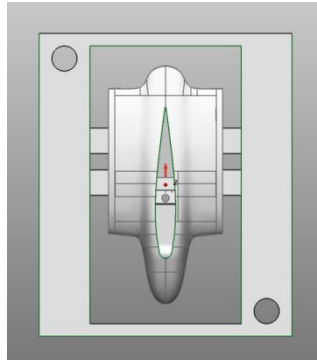


Figura 21 - Torpedo e seu esqueleto

4.4 Material

Uma vez definido o tamanho dos blocos de material a serem maquinados, foi então necessário definir qual o material a ser maquinado. Uma vez que a peça será utilizada em ambientes marinhos, estando em contacto com a água do mar, que é um meio muito corrosivo devido ao cloro presente no sal, cloreto de sódio, foi necessário a utilização de uma liga de alumínio que apresentasse uma elevada resistência à corrosão e também uma elevada resistência mecânica. Após alguma pesquisa, foi escolhida uma liga da série 5000, que são ligas de alumínio com uma elevada percentagem de magnésio e de manganés. A adição do magnésio ao alumínio aumenta a resistência mecânica do alumínio por solução sólida e melhora também o endurecimento por encruamento. Estas ligas são muito utilizadas na indústria naval e de transporte, uma vez que apresentam o melhor compromisso entre elevada resistência mecânica e alta resistência à corrosão.

Foram contactadas empresas como a Status Alumínio e a Universal, de modo a obter o melhor orçamento possível para o material com o tamanho pretendido. Foram pedidos orçamentos para dois blocos com tamanho de 480 x 175 x 30 mm de uma liga de alumínio da série 5000, ou seja com magnésio, e um outro bloco com 240 x 200 x 40 mm. Depois de uma visita das instalações da Universal, foi recebido o orçamento para as peças em questão. A liga proposta foi a liga EN AW -5083 que tem uma densidade de 2 786kg/m³ e o orçamento dado foi de 2,40€/kg. Sendo que o volume total dos blocos é de 0.00444 m³, o preço total foi então de 45,24€ mais IVA, totalizando em 55,65€.

A empresa Universal forneceu ainda as composições e principais valores de resistência mecânica para esta liga. Estes valores podem ser observados nas tabelas 1 e 2 abaixo.

Tabela 1 - Composição química da liga EN AW -5083

Liga	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Zn
EN AW - 5083	0.06	0.04	0.15	4.7	0.67	0.09	0.03

Tabela 2 - Principais valores de resistência mecânica da liga

Liga	%A (L ₀ =5 _{d0})	RM (MPa)	Rp 0.2% (MPa)
EN AW -5083	28	286	138

4.5 CAM

Uma vez que as peças não serão maquinadas de uma só vez, ou seja, será necessário maquinar a parte superior, virar a peça e então maquinar a parte inferior, sendo de grande importância certificar que os planos de trabalho se encontram no centro da peça a ser maquinada. Apesar de ser um passo de muito simples execução, não deixa de ser de extrema importância pois, se os planos de trabalho não estiverem correctamente alinhados, quando se virar a peça para se maquinar a parte inferior da peça, os alinhamentos não serão perfeitos, fazendo com que toda a peça seja descartada.

Toda definição dos percursos de maquinagem foi realizada com a utilização do software CAD PowerMILL da Delcam, disponível na empresa CINFU. Assim, após certificar que os planos de trabalho estavam correctamente definidos, a primeira estratégia a ser definida é a de facejamento das faces do bloco de material. Este facejamento é necessário uma vez que os blocos chegam do fornecedor, empresa Universal, com um desvio de superfície de 0,5 mm daquilo que foi pedido. Este desvio das superfícies é comum acontecer, pelo que o facejamento é várias vezes efectuado como um processo de pré-maquinação. Foi então definido a remoção de 1 mm ao topo e às laterais do bloco. A certificação do paralelismo entre superfícies é de grande importância uma vez que o torpedo será maquinado em duas etapas diferentes, sendo o bloco virado ao contrário, o paralelismo entre as superfícies facilita a definição de plano de trabalho da peça para que a precisão dimensional seja assegurada. Esta estratégia está representada na figura 22.

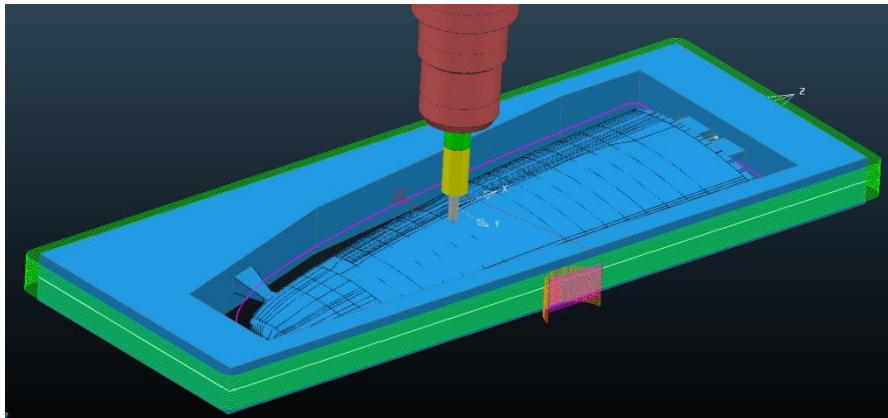


Figura 22 - Estratégia de contorno

Depois de efectuado o facejamento do bloco passou-se para a etapa seguinte da definição do percurso de maquinagem. O desbaste tem como objectivo a remoção do máximo de material possível, no menor tempo possível, sem que danifique a superfície final da peça. Para a definição desta estratégia, foi necessário consultar quais as ferramentas disponíveis e foi então escolhido uma fresa rasa de diâmetro 15,48 mm. A estratégia de desbaste utilizada foi a de desbaste de modelo, com um passo lateral

da ferramenta de 0.8% do diâmetro da ferramenta, ou seja, 9,6 mm e um passo vertical de 1 mm. Na figura 23 está representado o percurso de maquinação acima discutido.

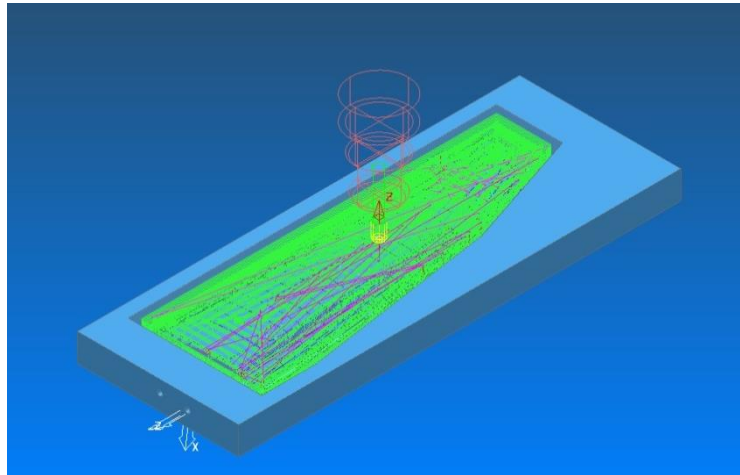


Figura 23 - Estratégia de desbaste

Definida a etapa de desbaste, foi utilizado uma ferramenta do software, que simula o resultado final do percurso em causa, chamada ViewMILL. Após uma observação do resultado final, chegou-se a conclusão que devido à ferramenta de diâmetro de 15.48 mm havia zonas onde a ferramenta não poderia trabalhar. Assim, criou-se um percurso de maquinação de redesbaste, utilizando uma ferramenta mais pequena toroidal, ou seja de pontas arredondadas. Com a nova ferramenta de diâmetro 8 mm e raio das pontas de 1 mm, executou-se novamente o ViewMILL e conclui-se que a etapa de desbaste estava concluída.

Uma vez criados os percursos de maquinação de desbaste, foi então altura de criar os percursos de maquinação para o acabamento da superfície. Uma vez que no desbaste foi deixado uma sobre espessura de 1 mm, foi necessário criar dois percursos de acabamento, pois de outra maneira a ferramenta iria tirar demasiado material numa só passagem o que poderia deixar marcas na superfície. Foi criado um percurso de semi-acabamento de Z constante otimizado, com uma ferramenta de ponta arredondada de diâmetro de 10 mm e raio de 5 mm que removeria cerca de 0,7 mm,

deixando apenas 0,3 mm para o último percurso de maquinagem. Na figura 24 , pode-se observar o percurso de semi-acabamento.

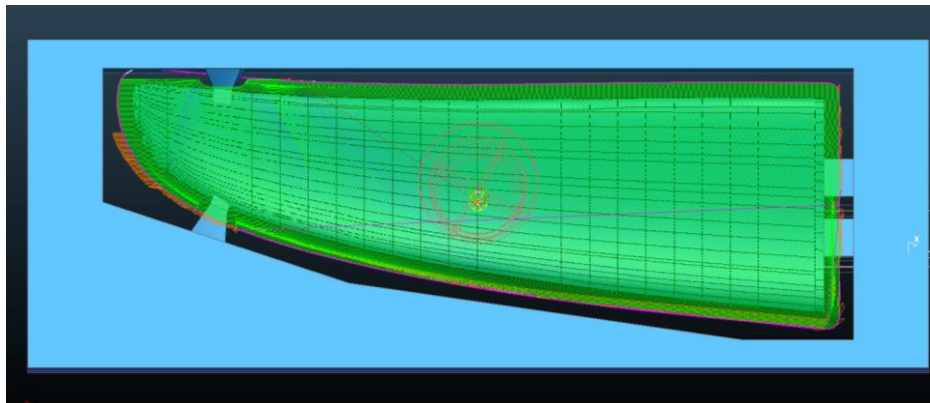


Figura 24 - Estratégia de semi-acabamento

Para finalizar a maquinação da parte superior da asa, criou-se então o percurso de acabamento. Para que a superfície ficasse com o melhor acabamento possível, foi criado um plano de trabalho com 5 graus de inclinação. Desta forma, o centro de maquinação inclinará a peça o que possibilita uma maquinação mais perfeita. Como se pode observar na figura 25 abaixo, a definição de um angulo de apenas 5 graus, melhora em muito a qualidade da superfície maquinada final. Em vez de maquinar com a parte central da ferramenta, que esmaga o material e não o remove correctamente, maquina com as arestas de corte da ferramenta, o que não só proporciona uma melhor superfície de acabamento mas também aumenta o tempo de vida da ferramenta, deixando as arestas de corte da ferramenta em boas condições.

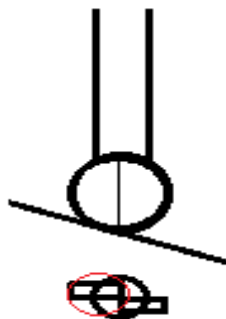


Figura 25 - Zona de corte de uma ferramenta redonda

A etapa de acabamento foi definida usando a estratégia de acabamento raster com um passo lateral de 0.2 mm e um passo vertical de 0,3 mm, que era o que restava de material a ser removido após o percurso de semi-acabamento. Na figura 26, pode-se ver este percurso de maquinagem.

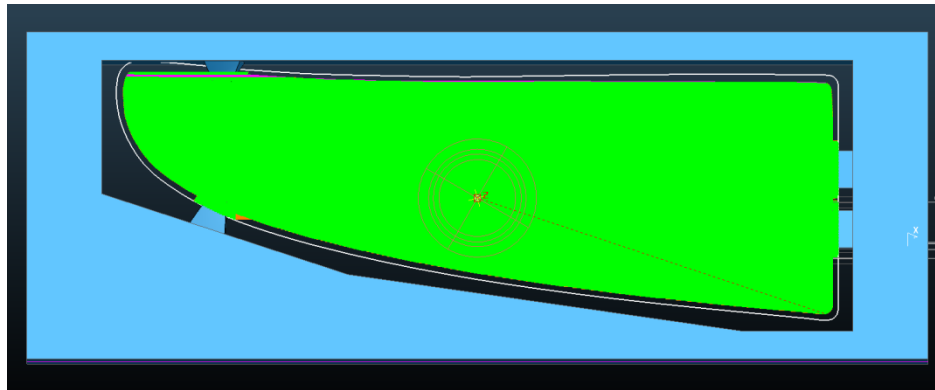


Figura 26 - Estratégia de acabamento

Concluída então a maquinação da secção superior da asa, definiu-se a estratégia dos furos que iriam unir a asa à peça central. Uma vez que a peça iria ser maquinada num centro de maquinação a 5 eixos, a estratégia foi definida utilizando os 5 eixos da máquina. De modo à estratégia ser efectuada no plano correcto, foi necessário definir um plano na superfície em questão. Uma vez que os furos teriam de ter uma elevada precisão dimensional, foi definida uma pre-furação de modo a pontear o furo, a estratégia de pontear foi definida utilizando uma ferramenta de 3mm de diâmetro e 20mm de comprimento. A utilização de uma ferramenta com um comprimento total pequeno evita que no momento de contacto com a superfície esta não ceda e mantenha a precisão do corte. Realizado o ponteamto, foi possível definir a estratégia de furação. Sendo que os furos tinham um diâmetro de 6mm, a ferramenta utilizada foi uma broca de diâmetro de 6mm e 75mm de comprimento de modo a efectuar a totalidade do furo. Na figura 27 que se segue, podem ver-se as estratégias de pontear e de furação.

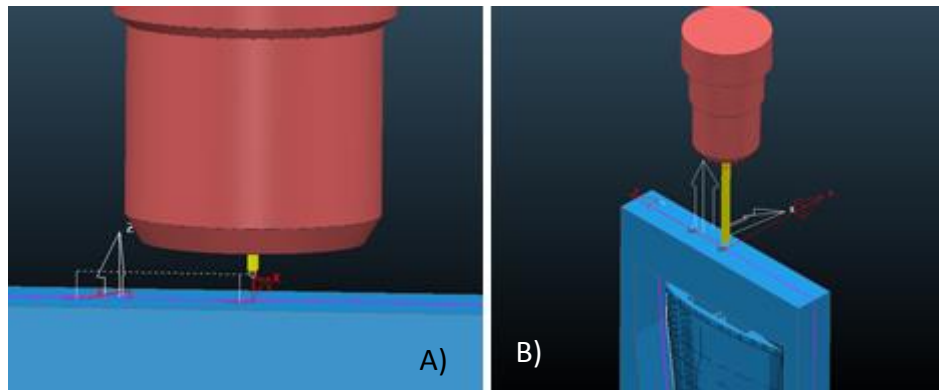


Figura 27 - A) Estratégia de pontear; B) Estratégia de furação

Após concluída a definição das estratégias de maquinação para a parte superior da peça e das furações, é então necessário definir as estratégias de maquinação da parte inferior da peça. Foi activado o plano de trabalho inferior, centrado à peça. Uma vez que a parte inferior da asa é muito similar, no que toca às superfícies, à parte superior, as estratégias definidas são muito similares às estratégias da parte superior. A primeira estratégia a ser definida foi a de desbaste, utilizando os mesmos passos verticais, horizontais e a mesma ferramenta aquela utilizada na estratégia da parte superior. A única diferença desta estratégia em relação à estratégia superior é a profundidade de maquinação. Uma vez que na maquinação superior foi definida para maquinar até uma profundidade de -10mm em relação ao centro da peça, seria necessário maquinar a uma profundidade inferior ao centro da peça. Esta estratégia está representada na figura 28 abaixo.

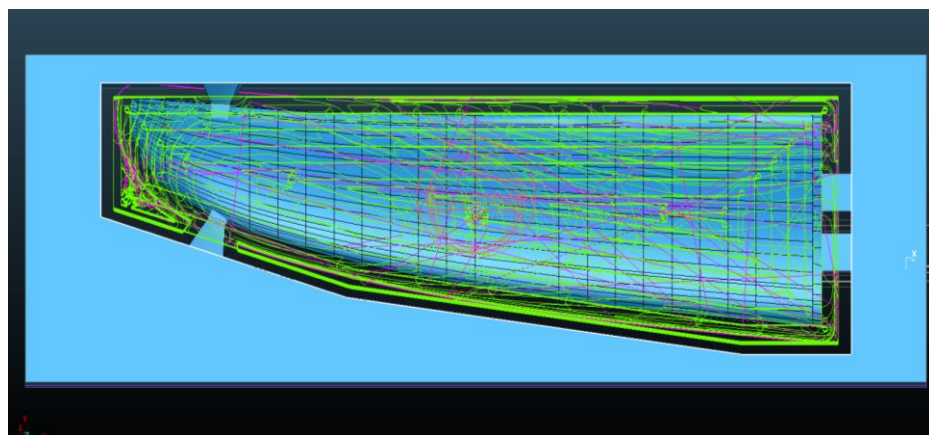


Figura 28 - Estratégia de desbaste

Assim como foi definido na parte superior da peça, a estratégia seguinte a ser definida foi o redesbaste. Este foi definido utilizando os mesmos parâmetros da estratégia superior, utilizando a mesma ferramenta e os mesmos passos verticais e horizontais. Na figura 29 seguinte pode-se ver a estratégia de redesbaste definida.

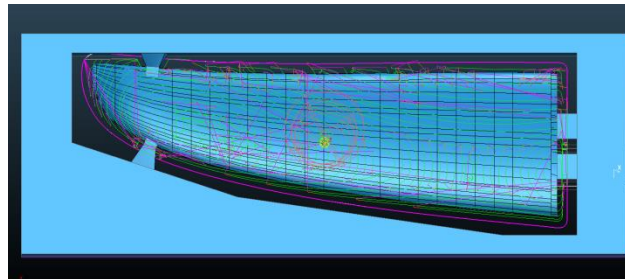


Figura 29 - Estratégia de redesbaste

Como após às estratégias de desbaste e redesbaste, a peça ainda apresenta uma espessura de material a ser removido de 0,7mm, foi também necessário definir uma estratégia de semi-acabamento de modo que no momento em que fosse efectuada a maquinação do acabamento final, a superfície apresentasse o melhor acabamento possível. A estratégia de semi-acabamento foi então escolhida utilizando os mesmos parâmetros, aqueles utilizados para o semi-acabamento da parte superior da asa, utilizando as mesmas ferramentas e os mesmos passos verticais e horizontais. Para o semi-acabamento foi definida também um limite de profundidade de maquinação até ao centro da peça. Na figura 30 apresentada seguidamente, pode-se ver esta estratégia representada.

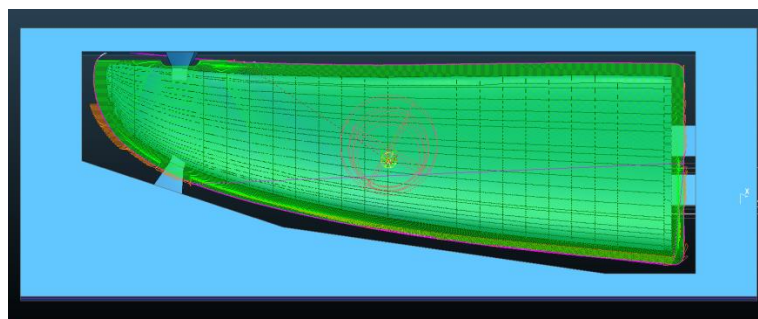


Figura 30 - Estratégia de semi-acabamento

Concluído o semi-acabamento e, seguindo a ordem de estratégias da parte superior da asa, a estratégia seguinte foi a de acabamento de superfície. Para esta estratégia foi

novamente usado o mesmo parâmetro de passo horizontal, de 0,3mm, utilizado na parte superior da peça, e a ferramenta utilizada foi a de diâmetro de 10mm com raio de 5mm, ou seja uma ferramenta esférica. Nesta estratégia foi também utilizada uma inclinação da peça de 5 graus de modo a melhorar o estado da superfície final. Na figura 31, pode-se ver esta estratégia mapeada.

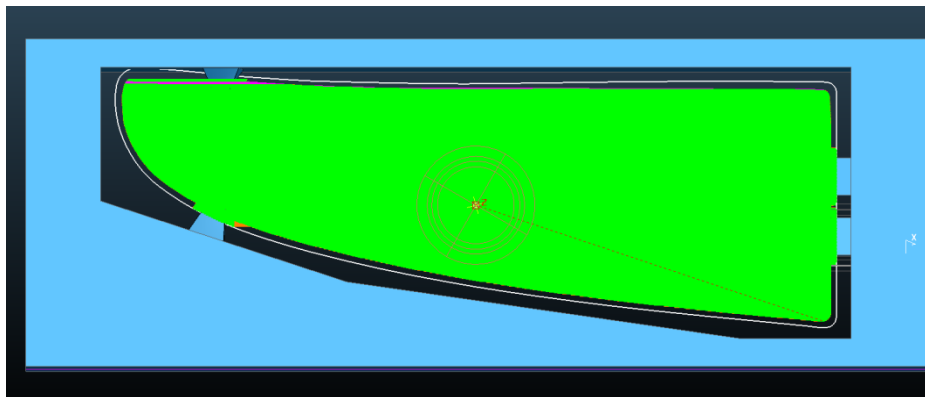


Figura 31 - Estratégia de acabamento

Para a asa do lado direito, as estratégias de maquinação realizadas foram iguais às descritas previamente. Uma vez criadas as estratégias, recorreu-se à ferramenta do software PowerMILL, ViewMILL para certificar, que das estratégias definidas resultaria uma superfície com um bom acabamento, certificando que não existiria nenhum erro nas superfícies em questão.

Definidas as estratégias de maquinação para as duas asas da peça foram escolhidas as estratégias de maquinação para a secção central designada de torpedo. Uma vez que o material em bruto veio do mesmo fornecedor, Universal, os desvios das superfícies do bloco apresentavam também um desvio de 0,5mm. A primeira etapa de maquinação a ser definida, foi a de facejamento da superfície de topo. Para esta estratégia, após uma consulta com os técnicos dos centros de maquinação, foi escolhida uma ferramenta rasa com um diâmetro de 50mm com pastilhas de corte. Definiu-se então no software, a remoção de 1mm em toda a superfície de topo, assegurando assim que o desvio da superfície do bloco fosse eliminado e que as superfícies superior e inferior fossem paralelas. O passo lateral definido para esta maquinação foi de 0.8 x 50mm, ou seja

40mm, de modo a que a maquinação decorresse no menor tempo possível mas que a superfície mantivesse um bom acabamento superficial.

Realizada a estratégia de facejamento de topo, foi necessário então assegurar que as superfícies laterais também são paralelas entre si e que as superfícies são rectas, lisas e sem defeitos. Assim, a estratégia de maquinação a ser definida seguidamente é a de contorno lateral. Novamente com ajuda dos técnicos dos centros de maquinação, foi definida a ferramenta a ser utilizada. Esta seria uma ferramenta rasa de diâmetro 15.48mm. O motivo pelo qual a ferramenta apresenta um valor de diâmetro com casas decimais é pelo facto de esta ferramenta já ter sido afiada, passando de um diâmetro de 16mm para 15.48mm. Definiu-se então a remoção de 1mm em todas as laterais do bloco e o passo vertical foi definido para 1mm a cada passagem. Esta estratégia está representada na figura 32 abaixo.

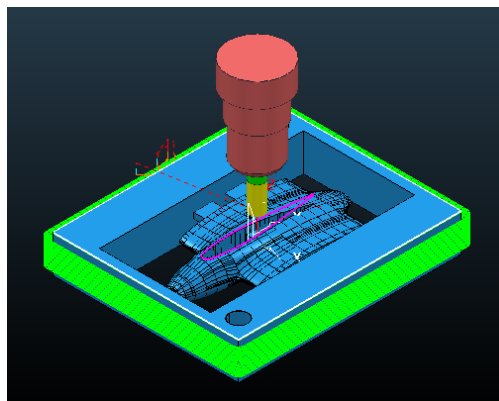


Figura 32 - Estratégia de contorno

Assegurado o paralelismo entre todas as superfícies, definiu-se então a primeira estratégia de maquinação da peça em sim. Esta foi a de desbaste do modelo. Utilizando uma ferramenta toroidal de diâmetro 12mm e raio de 1,5mm, definiu-se o passo vertical e o passo horizontal. Estes foram de 1mm para o passo vertical e 9,6mm para o passo horizontal sendo este valor 80% do tamanho total do diâmetro da ferramenta. Utilizando este valor, assegura-se que a superfície após maquinação é de boa qualidade e a maquinação decorre no menor tempo possível. Se fosse utilizado menos de 80% do diâmetro total da ferramenta como passo horizontal, a superfície final seria de boa qualidade, mas a maquinação demoraria mais tempo. Se o passo

horizontal fosse definido com mais de 80% do diâmetro da ferramenta, a maquinação seria muito rápida, mas a superfície final poderia apresentar alguns defeitos de maquinação com cristas. Na figura 33 apresentada abaixo pode-se ver a estratégia de desbaste representada graficamente, utilizando o software.

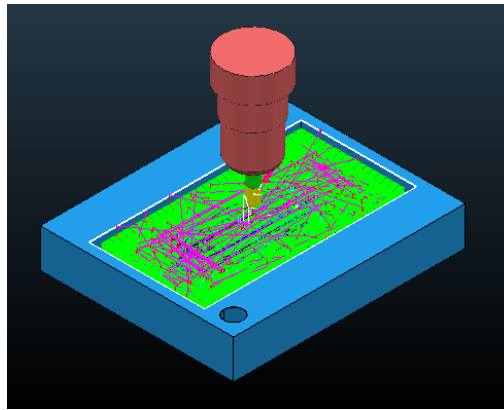


Figura 33 - Estratégia de desbaste

Após a definição do desbaste a próxima estratégia a ser definida foi a de redesbaste. As estratégias de redesbaste são efectuadas pois, após a maquinação do desbaste, existe ainda uma espessura de considerável de metal acima da superfície pretendida. Uma vez que na estratégia de desbaste a ferramenta vai descendo em incrementos de 1mm, passo vertical, no eixo de Z, esta resulta numa superfície com degraus. Com a utilização desta estratégia, os degraus de metal sobre a superfície pretendida são diminuídos para uma altura de 0,5mm de altura. O redesbaste prepara então a superfície para a próxima estratégia de maquinação da superfície: o acabamento. Quanto menos material estiver a mais, melhor será o acabamento. Assim, utilizando uma ferramenta toroidal de diâmetro 8mm e raio 1mm, definiu-se a estratégia de redesbaste para diminuir os degraus ate uma altura de 0,5mm. Na figura 34 representada abaixo pode- se ver a estratégia de redesbaste representada.

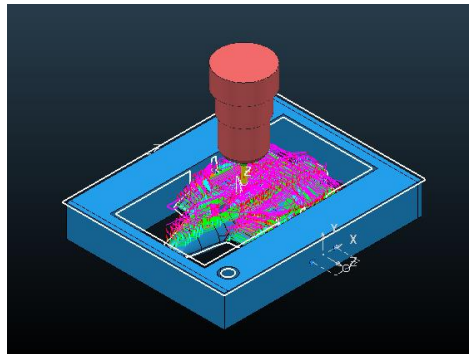


Figura 34 - Estratégia de redesbaste

Sendo que a parte central da peça irá ser encaixada e aparafusada ao leme do barco, esta tinha de ser maquinada com grande precisão dimensional. Como o desenho do leme se assemelha aquele de uma asa, com uma secção da parte dianteira redonda e uma secção traseira com uma aresta viva, de modo a melhorar a hidrodinâmica, o encaixe na parte central da asa tem a mesma geometria. Esta geometria representa então um desafio em termos de maquinação. Com uma secção traseira em aresta viva e uma profundidade da cavidade de cerca de 25mm, foi necessário pensar quais ferramentas seriam utilizadas e qual a melhor maneira de definir a estratégia de maquinação. Assim, foi definido em primeiro lugar um redesbaste da secção junção do leme à asa e escolhida uma ferramenta rasa de raio 6mm e com um comprimento de 30mm, assegurando assim que a ferramenta maquinaria em toda a profundidade da junção. Foi definido ainda um passo vertical de 0,5mm de modo a que os degraus fossem o mais pequenos possíveis. Esta estratégia pode ser observada na figura 35.

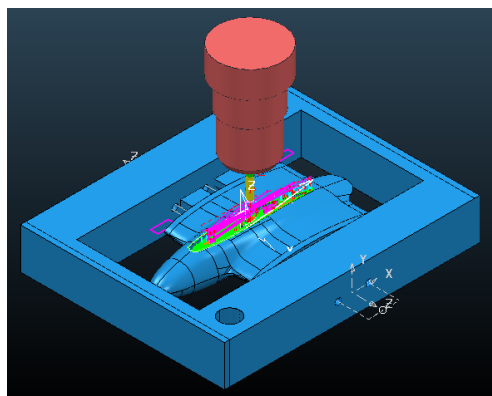


Figura 35 - Estratégia de redesbaste da junta

De modo a maquinar a aresta viva na secção traseira da junção, foi decidido, utilizando a ajuda dos técnicos, que a melhor maneira de realizar seria a utilização de ferramentas cada vez mais pequenas, de modo a obter-se uma aresta cada vez mais pequena. Assim foram escolhidas duas estratégias de maquinação, utilizando ferramentas rasa de diâmetro 4mm e de 2mm. Uma vez que estas ferramentas são de espessura muito pequena, as velocidades de avanço da ferramenta e os passos verticais tiveram de ser definidos de modo a que as ferramentas não sofressem danos ou partissem. Para a primeira estratégia com a ferramenta de diâmetro 4mm, o passo vertical foi definido como 0,3mm a cada passagem. Para a estratégia com a ferramenta de diâmetro de 2mm, o passo vertical foi definido como 0,1mm. Desta forma assegurou-se que as ferramentas não iriam partir nem sofrer danos. Na figura 36, estão representadas as estratégias acima referidas.

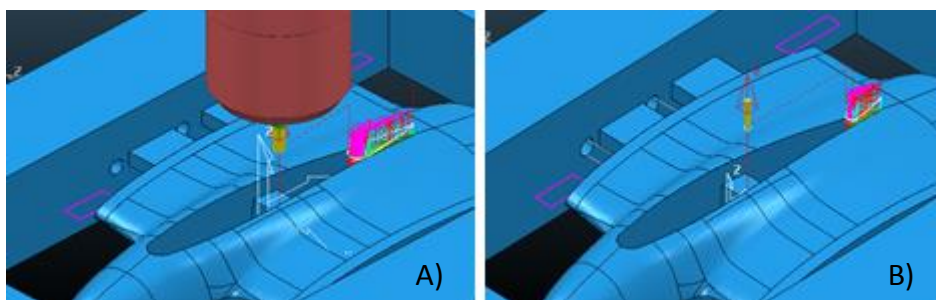


Figura 36 - A) Estratégia de redesbaste diametro 4mm; B) Estratégia de redesbaste diametro 2mm

Para concluir a maquinação da parte superior do torpedo definiu-se então o acabamento da superfície. Para esta estratégia foi então escolhida uma ferramenta de ponta redonda de diâmetro 12mm. Para esta peça não foi necessário a inclinação de 5 graus efectuada nas estratégias das asas pois as superfícies do torpedo tem uma geometria mais complexa, em que quase toda a superfície faz um angulo superior a 5 graus, sendo que a ferramenta maquina com precisão todas as superfícies. Como anteriormente, foi definido um passo horizontal de 0,3 mm de modo a não criar crista na superfície devido à ferramenta. Abaixo, pode-se ver na figura 37 esta estratégia representada.

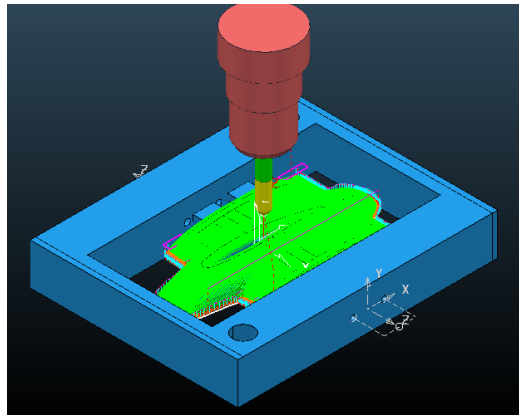


Figura 37 - Estratégia de acabamento

Executada a estratégia de maquinação da parte superior, definiu-se então as estratégias da parte inferior da peça. Uma vez que a superfície inferior é bastante mais simples do que a superfície superior, pois não tem a junção do leme, a definição das estratégias de maquinação tornou-se mais simples. Após a definição do plano de trabalho no centro da peça, foram efectuados o desbaste e o redesbaste da superfície, exactamente com os mesmos parâmetros da parte superior. Na figura 38 que se seguem estão representadas as estratégias acima referidas.

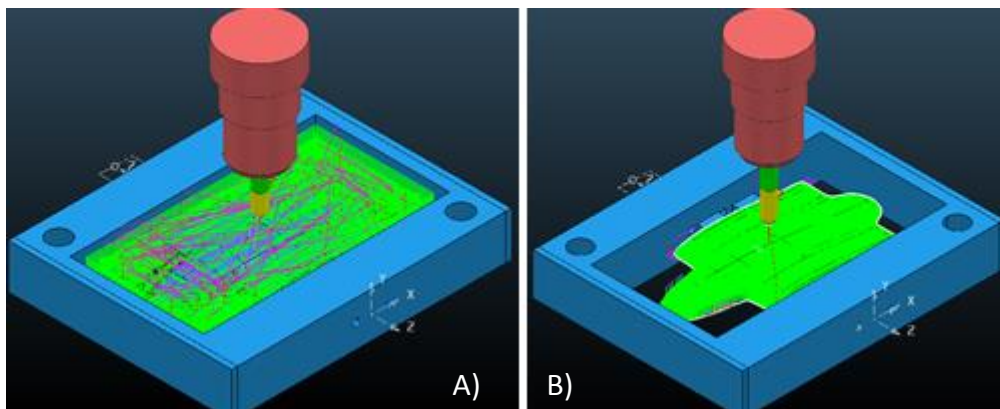


Figura 38 - A) Estratégia de desbaste; B) Estratégia de acabamento

Uma vez que o leme se prende ao hidrofoil utilizando um parafuso de diâmetro de 6mm, foi necessário definir a estratégia de maquinação para o realizar. Assim como para os furos efectuados para as asas, foi necessário criar uma estratégia de pontear e outra estratégia de furação. As ferramentas utilizadas foram as mesmas utilizadas para

os furos das asas e os parâmetros de avanço de ferramenta foram os mesmos. Na figura 39 abaixo estão representadas as duas estratégias referidas.

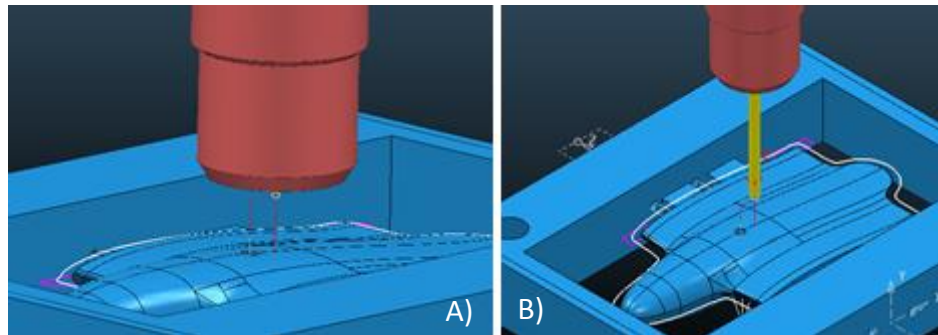


Figura 39 - A) Estratégia de pontear; B) Estratégia de furação

A estratégia de acabamento de superfície foi deixada para ultimo pois, após a realização do furo, poderiam resultar rebarbas de metal na peça. Como a estratégia de acabamento será a ultima na superfície em questão, todas as rebarbas resultantes da furação ou de outras estratégias de maquinação, irão desaparecer. Como anteriormente, os parâmetros de maquinação foram baseados na estratégia de acabamento da parte superior, utilizando a mesma estratégia, o mesmo passo horizontal e a mesma ferramenta. Na figura 40 que se segue está representada esta mesma.

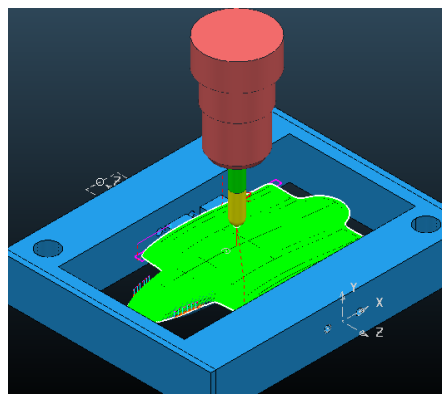


Figura 40 - Estratégia de acabamento

Uma vez que o torpedo também tem furos nas suas laterais, para que as asas possam ser encaixadas, foi necessário realizar as estratégias de maquinação destes furos.

Depois de escolhidos os planos de trabalho e após discussão com os técnicos, chegou-se à conclusão que a peça iria ser presa na sua lateral com a utilização de uma prensa. Neste caso, a maquinação não foi realizada com a utilização dos 5 eixos da máquina, uma vez que o bloco era de tamanho mais reduzido, não ultrapassando os limites da mesa, havendo colisão da haste de suporte da ferramenta, o que poderia danificar tanto a haste e a ferramenta, como também a mesa do centro de maquinação. Uma vez que os furos das laterais são iguais àqueles das asas, as ferramentas definidas são as mesmas, assim como todos os parâmetros de furação, passo vertical e avanço. As furações irão ser realizadas, como para o caso das asas, numa superfície lisa, foi definido primeiramente a estratégia de pontear para que no momento da furação com a broca os furos mantivessem a sua precisão dimensional.

4.6 Maquinação da peça

A empresa CINFU dispõe de três centros de maquinação nas suas instalações. Dois centros de maquinação a 3 eixos e um outro a 5 eixos. Uma vez que apenas o centro de maquinação a 5 eixos, é o único com uma área útil de maquinação suficientemente grande para maquinar as peças em questão, foi este o escolhido para realizar o projecto. O centro de maquinação a 5 eixos é da marca Hermle, modelo C20 U e é de tamanho relativamente grande, cerca de 2,60 metros por 3 metros de largura e 3 metros de altura. A área útil de trabalho útil deste centro de maquinação é de 600mm no eixo de X, 450 mm no eixo de Y e 450 mm no eixo de Z e atinge velocidades lineares de 45 m/min nos eixos X Y e Z. A velocidade máxima de rotação de ferramenta é de 18 000 rpm e estas aplicam uma força máxima de 7 000 N. Na figura 41 seguidamente pode ver-se uma imagem do centro em questão.



Figura 41 - Centro de maquinação Hermle

A primeira peça a ser maquinada foi, então, a asa do lado esquerdo. Como foi dito anteriormente, o bloco de metal em bruto tem dimensões de 480 x 175 x 30 mm, o primeiro passo a ser realizado é o aperto do bloco no centro de maquinação. Foram então efectuados dois furos de 12mm de diâmetro, da mesma largura dos parafusos utilizados para prender o bloco ao centro de maquinação. Nos mesmos furos de 12mm, foi efectuado um furo até meio da largura do bloco com 18mm de largura para que a cabeça do parafuso ficasse inserida dentro do bloco, permitindo assim a maquinação da face superior do bloco. Na figura 42 que se segue pode-se ver o bloco já preso, no centro de maquinação e a primeira e a segunda maquinação já efectuadas, sendo o tempo de maquinação para o facejamento de topo, de cerca de 4 minutos e para o contorno lateral de 7 minutos.

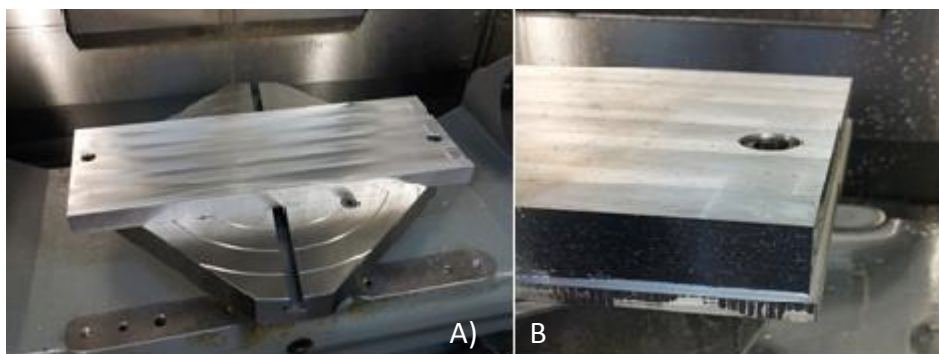


Figura 42 - A) Maquinação de topo concluída; B) Maquinação do contorno

Uma vez efectuadas as maquinagens da face superior e das faces laterais, assegurando assim o paralelismo de todas as faces, foi definido o plano de trabalho da peça utilizando o palpador do centro de maquinação. O plano de trabalho foi então definido no centro do bloco, tal como tinha sido efectuado na definição das estratégias de maquinação. O tempo de maquinação para o desbaste foi de cerca de 23 minutos e esta representada na figura 43 o resultado final.

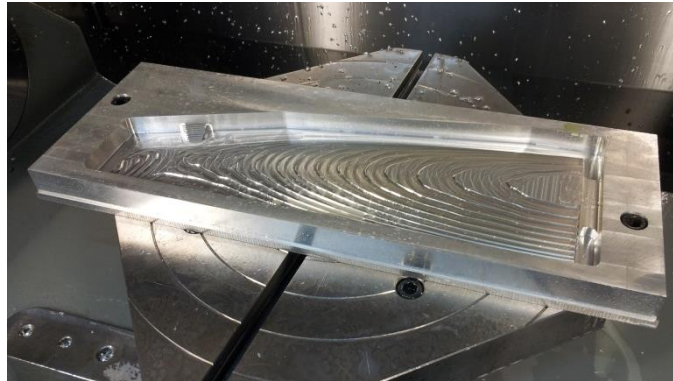


Figura 43 - Maquinação de desbaste concluída

Realizado o desbaste primário, foi então efectuado o redesbaste de modo a reduzir o tamanho dos degraus de maquinação. O tempo total de maquinação do redesbaste foi de 12 minutos, estando representada na figura 43 apresentada seguidamente o resultado final desta maquinação.

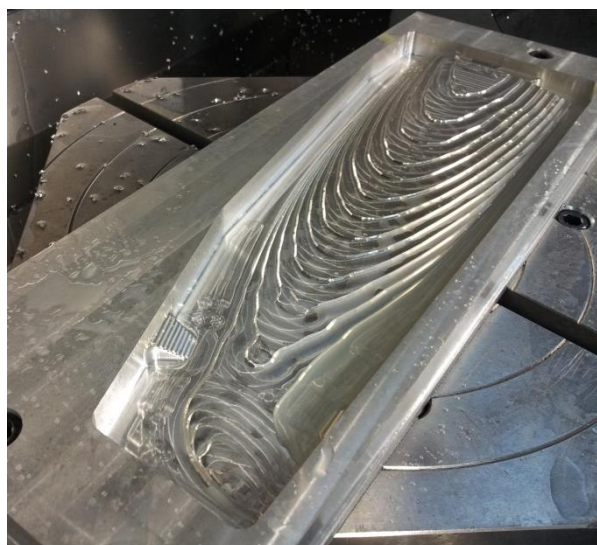


Figura 44 - Maquinação de redesbaste concluído

Com a maior parte do material retirado do bloco, ficou só uma espessura de 1mm até à superfície da peça final, foi então efectuada o semi-acabamento da parte superior da asa esquerda. Esta maquinação teve um tempo total de 46 minutos. Na figura 45 seguidamente, pode ver-se a maquinação a decorrer.

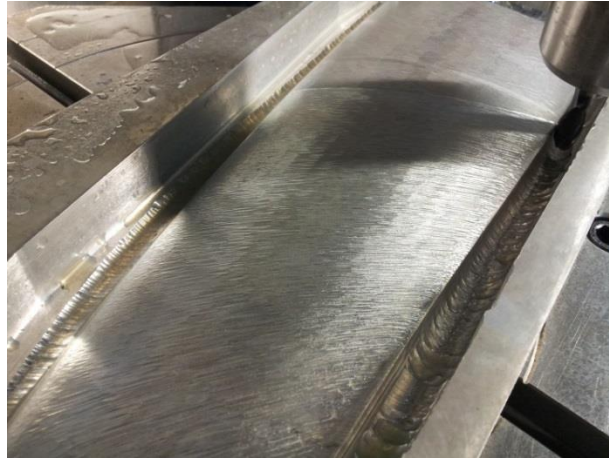


Figura 45 - Maquinação do semi-acabamento

Como é evidente pela figura acima, a superfície final desta maquinação está longe de ser perfeita, uma vez que esta se encontra muito rugosa. Foi então efectuada o acabamento da superfície superior da asa, a um angulo de 5 graus como foi explicado previamente, e o tempo total de maquinação foi de 54 minutos, estando representado a superfície resultante na figura 46, apresentada seguidamente.

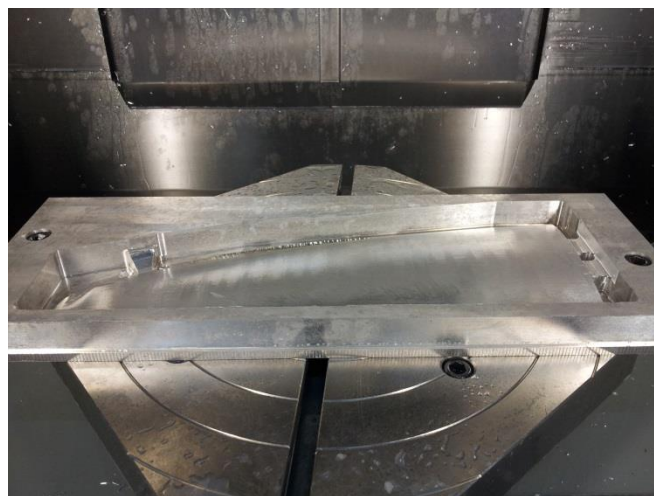


Figura 46 - Maquinação do acabamento concluído

Estando efectuada a maquinação da parte superior da peça, a maquinação a ser efectuada seguidamente foi a de execução dos furos que iram ligar à parte central do hidrofoil. Esta maquinação foi realizada utilizando o 4 e 5 eixo do centro de maquinação. Como foi definido previamente, a primeira maquinação a ser realizada foi a de pontear, que teve uma duração de 1 minuto, e a segunda maquinação, a qual realizou os furos teve um tempo total de maquinação de 2 minutos, representada na figura 47.



Figura 47 - Maquinação do furos com a utilização dos 5 eixos da máquina

Uma vez criados os furos, a peça foi então solta da mesa e foram removidas quaisquer aparas que tenham resultado das maquinações efectuadas. A mesa do centro de maquinagem foi também limpa de forma a certificar que quando a peça fosse colocada novamente, esta ficaria perfeitamente assente na mesa, assegurando assim que a peça ficasse estavel. Como foi definido nas estratégias de maquinação, a primeira maquinação efectuada foi a de desbaste. Esta maquinação teve um tempo total de 16 minutos e o resultado final da mesma está representado na figura 48 apresentada seguidamente.

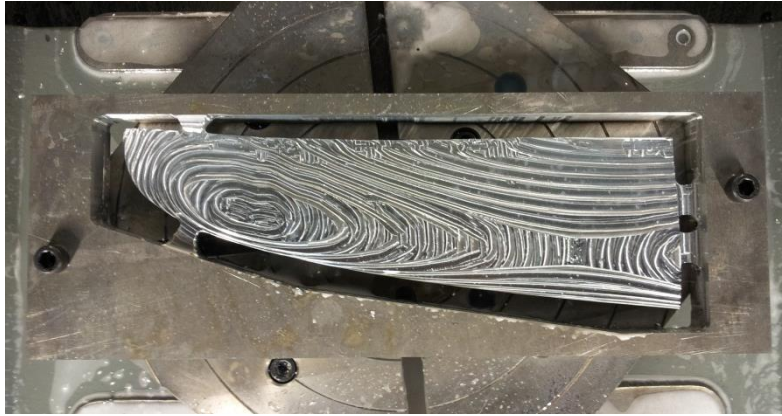


Figura 48 - Maquinação de desbaste concluído

Estando o desbaste feito, a próxima etapa efectuada foi então o redesbaste. Esta maquinação teve um tempo de 9 minutos e o resultado final esta representado na figura 49 seguidamente.



Figura 49 - Maquinação de redesbaste concluído

A etapa seguinte foi, então, o semi-acabamento e teve um tempo total de 46 minutos. Na figura 50 seguidamente a maquinação foi parada a meio para que se pudesse ver a diferença entre as diferentes etapas.



Figura 50 - Maquinação do semi-acabamento concluído

Tal como na parte superior da asa, o acabamento final da superfície foi efectuado utilizando uma inclinação de 5 graus em toda a peça. Esta inclinação é conseguida movendo o eixo C do centro de maquinação. Assim como no acabamento da parte superior, esta maquinação teve um tempo total de 54 minutos e o resultado final está representado na figura 51.



Figura 51 - Maquinação da asa esquerda concluída

Contabilizando todos os tempos de maquinação, a asa esquerda teve um tempo total de 4 horas e 34 minutos, sendo este tempo repartido ao longo de dois dias uma vez que todos os processos intermédios, como virar a peça, prende-la na mesa, demoram algum tempo. Para retirar a peça do esqueleto foi utilizada uma serra de banda, para cortar as ligações entre o esqueleto e a peça. Todos os excessos foram removidos

manualmente com uma lima e lixa de 180. O acabamento final da peça foi conseguido utilizando uma lixa de 320. A peça foi então pesada de forma a comparar com a peça original. O peso registado foi de 621.9 gramas. Na figura 52 apresentada seguidamente, pode-se ver a asa esquerda já finalizada.



Figura 52 - Asa esquerda

Uma vez que a asa direita foi espelhada usando a asa esquerda, todo o processo de maquinação é igual ao da asa esquerda. Todo o processo foi então repetido para a asa direita, sendo o tempo de maquinação de 4 horas e 34 minutos e o peso da asa registado foi de 622 gramas. Esta pode ser observada na figura 53 apresentada seguidamente.



Figura 53 - Asa direita finalizada

Uma vez efectuadas as duas asas, resta apenas efectuar a maquinação do torpedo, ou seja a secção central do hidrofoil. Tal como foi dito anteriormente, o bloco de material tem as dimensões de 240 x 200 x 40 mm e tal como para a maquinação das asas, foram efectuados dois furos de 12mm de diâmetro para permitir que os parafusos

prendessem o bloco na mesa do centro de maquinagem. Como foi previamente dito, de forma a assegurar o paralelismo de todas as faces do bloco, de forma a definir, com precisão, o plano de trabalho da peça, as primeiras duas maquinações foram o facejamento de topo e o contorno lateral da peça. Estas duas tiveram um tempo total de 1 e 2 minutos respectivamente. Na figura 54 que segue pode-se ver o resultado destas duas etapas de maquinação.

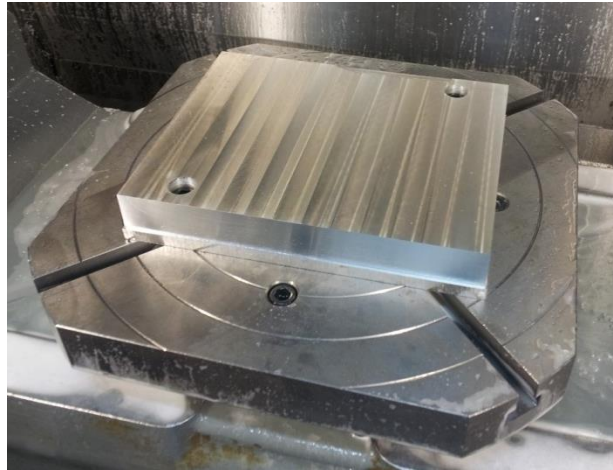


Figura 54 - Maquinação de facejamento de topo e contorno já concluído

Com o plano de trabalho da peça bem definido, a primeira maquinação realizada foi a de desbaste. Esta teve um tempo total de 18 minutos e na figura 55 seguidamente pode-se observar o resultado final.

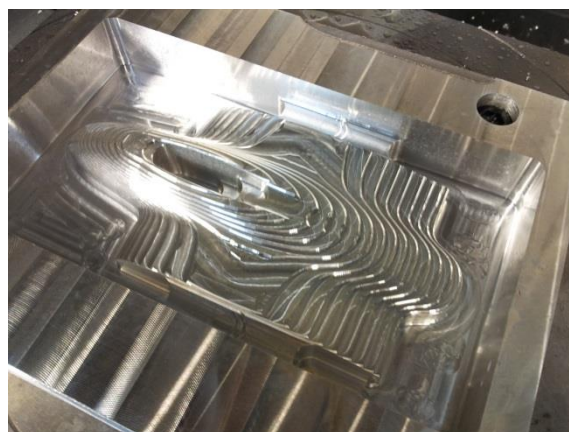


Figura 55 - Maquinação de desbaste concluído

Como foi definido, a etapa seguinte é a de redesbaste. Esta etapa é realizada de forma a reduzir os degraus resultantes da maquinação de desbaste e remover material em excesso até 0.5 mm da peça. O tempo total de redesbaste foi de 8 minutos e na figura 56 seguidamente pode-se observar o resultado desta maquinação.

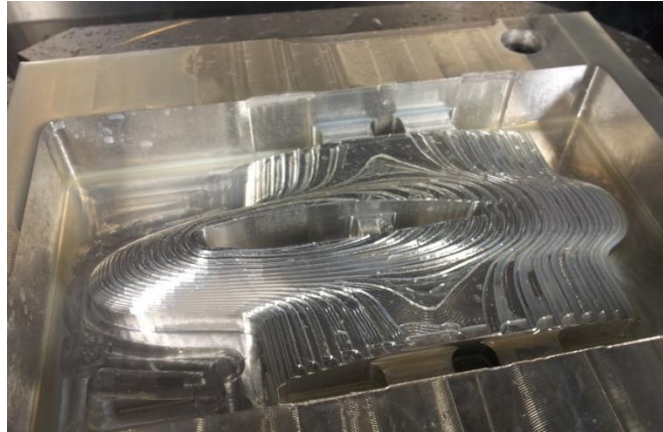


Figura 56 - Maquinação de redesbaste concluído

As duas etapas seguintes foram a maquinação da aresta viva na junção do leme ao hidrofoil. Estas maquinações, tal como foi dito anteriormente, foram efectuadas com o uso de uma ferramenta rasa de diâmetro de 4mm e uma ferramenta rasa de diâmetro de 2mm. O tempo de maquinação destas etapas foi de 15 minutos e 18 minutos, respectivamente. Na figura 57 apresentada seguidamente pode-se observar o resultado.



Figura 57 - Maquinação da junta do leme concluída

Após a maquinação da arresta viva da peça, a ultima maquinação na parte superior da peça foi a de acabamento da superfície. Esta, teve um tempo total de 32 minutos e o resultado final desta pode ser observada na figura 58 apresentada seguidamente.



Figura 58 - Maquinação de acabamento concluído; Zonas a vermelho: erros de maquinação

Antes de a peça ter sido solta da mesa e limpa de todas as aparas resultantes das maquinações, esta foi inspeccionada. Foi descoberto um erro, um excesso de material, encontrado nas zonas em que as asas iriam juntar com a peça, zonas a vermelho na figura 58. Foi rapidamente definida uma estratégia para remover esse excesso de material. No decorrer desta maquinação, ocorreu um erro, pelo que a ferramenta entrou na superfície da peça a uma profundidade de 0,7mm.

Este erro teve origem na definição da estratégia de maquinação e notava-se muito na superfície. De modo a corrigir este erro, o plano de trabalho foi baixado 1mm e foram repetidas as etapas de maquinação da aresta viva e a de acabamento. Após esta repetição, a peça foi solta da mesa do centro de maquinação e limpa. A mesa foi também limpa e a peça foi então presa novamente com a parte inferior virada para cima. A primeira maquinação a ser realizada na parte inferior do torpedo foi a de desbaste, seguido do redesbaste e da furação que iria prender o leme ao hidrofoil. A etapa de desbaste teve um tempo total de 14 minutos, a maquinação de redesbaste teve um tempo total de 8 minutos e a maquinação do furo teve um tempo total de, 1 minuto para pontear o furo, e de 2 minutos para furar. O resultado destas três maquinações pode ser observado na figura 59 apresentada seguidamente.

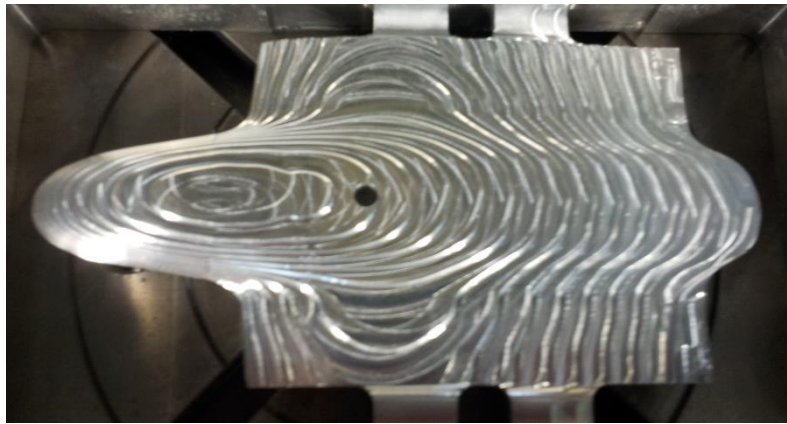


Figura 59 - Maquinações de desbaste e furação concluídos

A última maquinação da superfície da parte inferior foi então o acabamento da superfície. Esta teve um tempo total 28 minutos e o resultado dela esta representado na figura 60 seguidamente.



Figura 60 - Maquinação do acabamento concluído

Devido ao erro que ocorreu durante a maquinação da parte superior do torpedo, o plano de trabalho da peça foi alterado. Quando a peça foi virada, a definição do plano de trabalho da peça foi incorrectamente realizado. Em vez de o plano ter sido definido 2mm a cima daquilo que realmente deveria ser, de forma a compensar a definição do plano de trabalho da superfície superior, este foi apenas alterado em 1 mm, pelo que resultou na remoção de um milímetro a mais em toda a superfície inferior. Este erro demonstra a importância de uma correcta definição dos planos de trabalho das peças

durante as maquinações. O facto de toda a superfície inferior estar 1 milímetro abaixo do que deveria estar não altera em nada a performance nem a funcionalidade do hidrofoil. Só quando o hidrofoil está todo montado, ou seja o torpedo com uma asa de cada lado, é que se nota a diferença na parte inferior do torpedo.

Uma vez concluída a maquinação do torpedo, este foi solto da mesa do centro de maquinação e as juntas do esqueleto à peça foram cortadas com a ajuda de uma serra de banda. Todos os excessos deixados pelo corte das juntas foram removidos com a utilização de uma lima e lixa de granulometria de 180 e 320. O peso registado do torpedo foi de 377,6 gramas e este pode ser visto na figura 61 apresentada seguidamente. O tempo total de maquinação do torpedo foi de 3 horas e 32 minutos, repartidos ao longo de três dias.



Figura 61 - A) Parte superior do torpedo; B) Parte inferior do torpedo

Com a utilização de 4 pinos de diâmetro de 6mm em aço, foi possível montar toda a peça. O peso total do hidrofoil é de 1,6215 quilogramas. Uma vez que a peça original tem um total de 856 gramas, a peça realizada em alumínio é 765,5 gramas mais pesada do que a peça original. Uma vez que a peça original é feita em carbono com resina epóxica, esta diferença era já esperada. Na figura 62 pode-se observar a peça toda montada, dando-se assim por concluído o projecto.

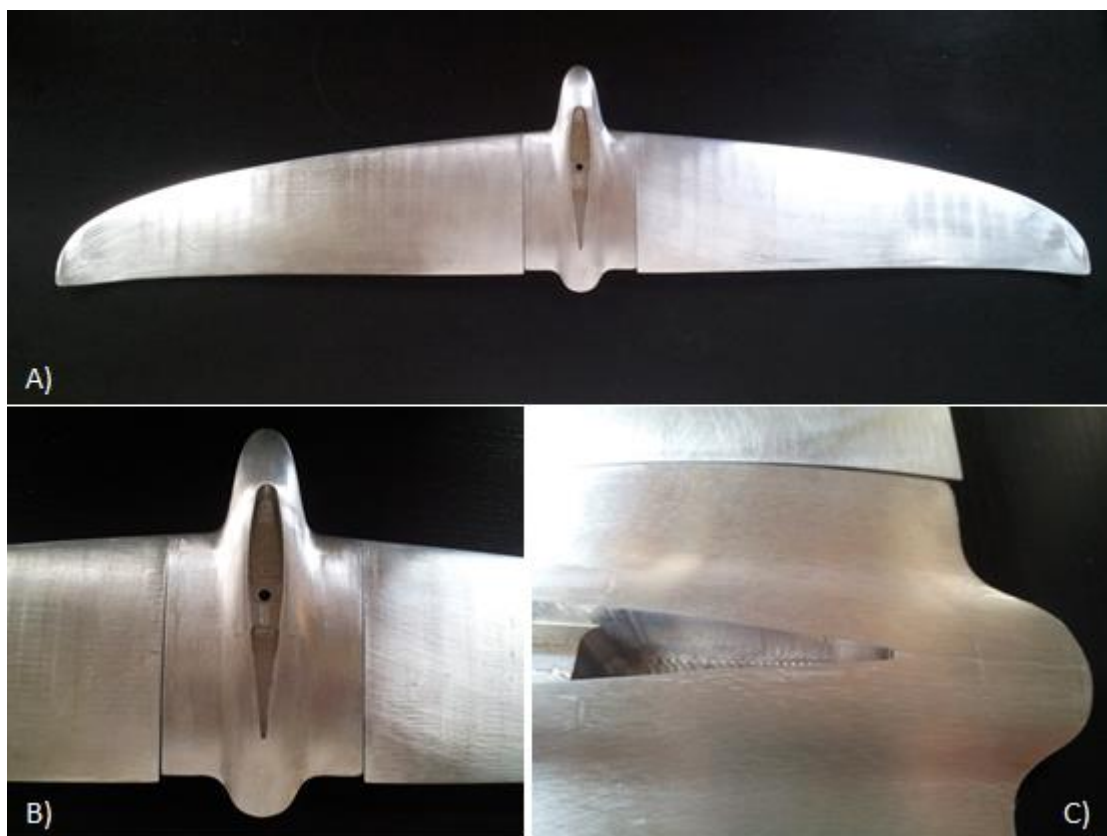


Figura 62 - A) Hidrofoil finalizado; B) Pormenor junção das asas; C) Pormenor da zona junção do leme

5 Conclusão

Uma vez concluído o projecto, considero que o estagio realizado na empresa CINFU foi um sucesso uma vez que todos os objectivos propostos foram cumpridos. A consolidação de todos os conhecimentos adquiridos durante a elaboração do seminário e durante a elaboração do projecto foi de elevada importância.

A utilização da engenharia inversa na elaboração do projecto, considero ser de grande importância, uma vez que é uma técnica muito utilizada na indústria de fundição.

Foi muito importante a realização e acompanhamento da maquinação da peça, uma vez que apenas quando esta foi realizada, é que aprendi quais os erros mais frequentes que ocorrem e como os prevenir. Considero que é de elevadíssima importância uma correcta definição dos planos de trabalho da peça para que não ocorra os erros cometidos durante este projecto

A elaboração do estágio na empresa CINFU foi ainda importante a nível pessoal uma vez que foi possível ter uma primeira abordagem ao mundo de trabalho na indústria de fundição portuguesa onde foram postos em prática todos os conhecimentos adquiridos no seguimento do Mestrado Integrado de Engenharia Metalúrgica e Materiais.

6 Bibliografia

- [1]- Lima, C. B. ; Tese de Mestrado “Engenharia Reversa e Prototipagem Rápida Estudo Casos”, Campinas, Universidade Estadual de Campinas, Fevereiro 2003
- [2]- Ferreira, J. C. ; Alves, N. F., “Integration of reverse engineering and rapid tooling in foundry technology”, Lisboa, Instituto Superior Técnico, Janeiro 2002
- [3]- Augusto, Vítor M. B. M. ; “Engenharia Assistida por Computador”; Texto de apoio à cadeira do 4º ano do Mestrado Integrado de Engenharia Metalúrgica e Materiais
- [4]-Ferreira, J. B. U. ; Tese de Mestrado “Desenvolvimento de Métodos de Produção de Componentes para Calçado em Célula Robótica”; Porto, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto; 2014
- [5]- Ruão da Cunha, P. ; Tese de Licenciatura “O Desenvolvimento de Produto”; Porto, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [6]- DELCAM UK, PowerSHAPE Training Course, 2012
- [7]- DELCAM UK, PowerMILL 5 axis Training Course, 2012
- [8]- “CopyCAD Delcam” [Online]. Disponível em : <http://www.copycad.com/> ; acedido em 15/07/2014